

# Az ITER töltéscsere diagnosztikájának fejlesztése

*Pokol Gergő<sup>1</sup>, Baross Tétény<sup>2</sup>, Zoletnik Sándor<sup>2</sup>, Szabó Viktor<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Egyetemi tanársegéd, BME NTI, EURATOM Association  
1521 Budapest, Pf. 91., Tel: +361 463 2469

<sup>2</sup> MTA KFKI-RMKI, EURATOM Association  
1525 Budapest, Pf. 49.

<sup>3</sup> BME MM, EURATOM Association  
1521 Budapest, Pf. 91.

---

A fúziós energiatermelés megvalósítására irányuló világméretű összefogás jelenlegi legnagyobb vállalkozása az ITER tokamak építése. Az ITER plazmaközepi töltéscsere-spektroszkópia (CXRS) diagnosztikájának építését az EU végzi KFKI RMKI és BME részvételrel. A CXRS diagnosztika arra a fizikai jelenségre épül, hogy a plazmába belőtt nagyenergiájú atomnyaláb atomfizikai folyamatokon keresztül karakterisztikus hullámhosszú fotonok keletkezését okozza. Ezen fotonokat a nyaláb optikai megfigyelésével detektáljuk, és az emisszió nyalábminti eloszlásából számos plazmaparaméter térbeli eloszlására tudunk következtetni. A magyar fél a CXRS periszkóp egy kritikus elemének mechanikai és hőtechnikai tervezését végzi, illetve a diagnosztika képességeinek bővítési lehetőségét vizsgálja sűrűségfluktuációs méréssel.

---

## Bevezetés

Az ITER tokamak világméretű összefogásban épül Cadarache-ban, Franciaországban. A berendezés legfontosabb célja, hogy demonstrálja a majdani fúziós energia-termelő reaktorhoz szükséges technológiák meglétét [1,2].

A tervek szerint 2018-ra felépülő berendezés tervezésében jelentős a magyar szerepvállalás. Egyéb részrendszerek mellett az ITER plazmadiagnosztikai rendszereinek fejlesztésébe kapcsolódunk be. A fúziós paraméterű plazmák mérés technikája eleve kihívásokat rejtő feladat, amihez az ITER esetében a nagy sugár-, hő- és mechanikai terhelések plusz megoldandó problémákat adnak, ami a különböző szintű tervezési fázisok iterációját teszi szükségessé.

## Az ITER plazmaközepi töltéscsere-diagnosztikája

Több másik részegység fejlesztése mellett a magyar mérnökök és fizikusok a plazmaközepi töltéscsere-diagnosztika megvalósításában vállaltak szerepet. Ez a diagnosztika arra épül, hogy egy 100 keV energiájú deutérium atomnyalábot lövünk a plazmába. A forró plazma és az atomnyaláb kölcsönhatására mind a nyalábatomok, mind a plazmaionok karakterisztikus sugárzást bocsátanak ki. Ezt detektálva a plazma összetételére, hőmérsékletére és mozgására lehet következtetni. A töltéscsere diagnosztika több olyan paramétert tud mérni, amit a plazma közepén más diagnosztika nem, így kiemelt jelentősége van.

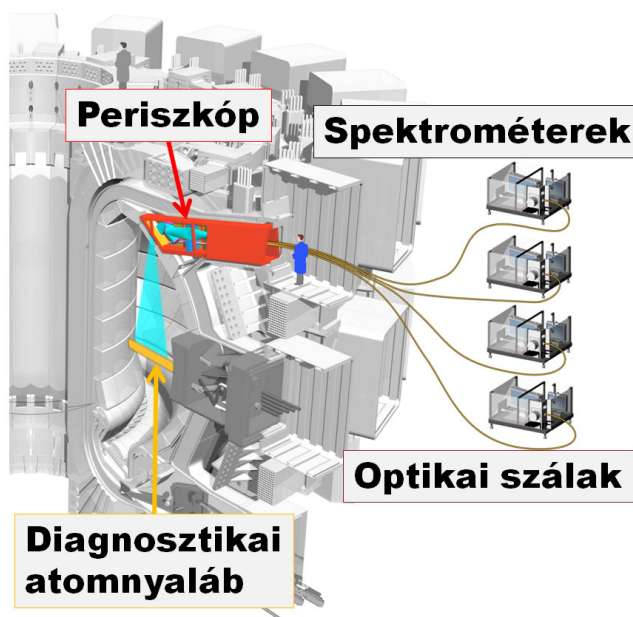
Az 1. ábra szerint a középsík porton belőtt *diagnosztikai atomnyaláb* plazmaközepi tartományát egy felső portban elhelyezett *periszkópon* keresztül figyeljük meg. A

periszkópban a várható sugárterhelés miatt csak fém tükröket lehet felhasználni a nyaláb képének továbbítására. A periszkóp hátsó faláról a képet *optikai szálakon* továbbítjuk a *spektrométerekhez*, ahol a spektrum megfelelő tartományait részletes spektrumelemzésnek vetjük alá. A detektált karakterisztikus spektrumvonalak amplitúdója a plazma összetételére, szélessége a plazma hőmérsékletére, eltolódása pedig a plazma forgási sebességére vonatkozóan ad információt [3].

## Magyar részvétel a fejlesztésben

A magyar fél egyik feladata a CXRS felső porti szerkezet, az ún. port-modul kivehető csövének tervezése. Ennek fő feladata a bizonytalan élettartamú komponensek cserélhetőségének biztosítása. Ilyen az első tükör, az első tükör előtti redőny-mechanizmus és a kalibrációs lámpa. A csőszerkezet tervezése során figyelembe kell venni a neutron- és gammafűtés mellett az elektromágneses hatásokat is, továbbá a kivehető csőnek meg kell felelnie az ITER karbantartási követelményeinek. Előre láthatóan a normál működési ciklus mellett kétévenként lesz lehetőség a cső cseréjére [3].

A magyar fél másik feladata annak a lehetőségnek a vizsgálata, hogy az ITER CXRS plazmára néző optikai periszkópjának felhasználásával lehetséges-e a nyaláb-emissziós spektroszkópia (BES) technikát felhasználva sűrűségfluktuációt mérni. Ennek a kérdésnek az eldöntése érdekében a fluktuációs BES mérést részletesen szimuláltuk. A kapott térbeli felbontás és jel/zaj viszony értékeket a tanulmányozni kívánt jelenségek megfelelő jellemzőivel hasonlítottuk össze [4].



1. ábra: Az ITER CXRS diagnosztikájának felépítése

### Mérnöki feladatok a periszkóp első tükrét tartó kivehető cső kapcsán

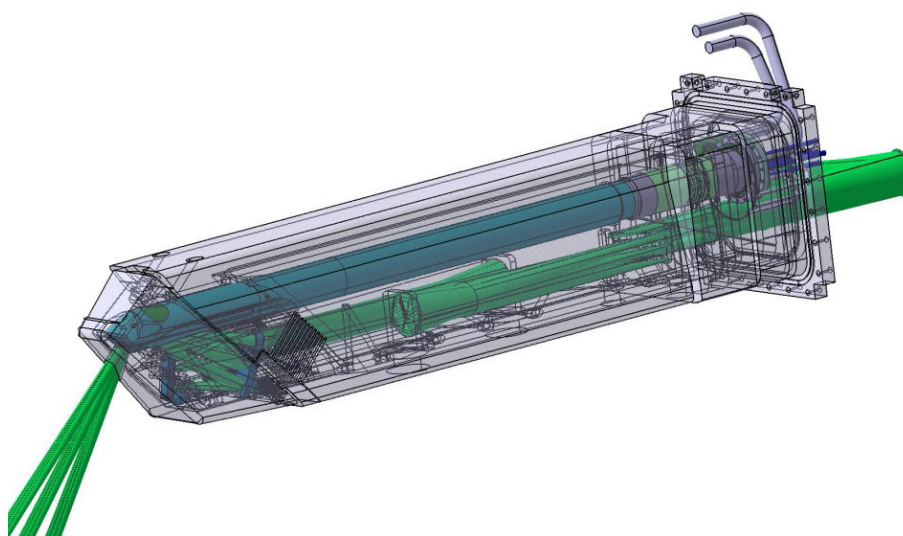
A CXRS periszkóp első tükrét - az összes többi optikai diagnosztikához hasonlóan - a plazma porlaszthatja, illetve lerakódásokat képezhet rajta. Ennek a folyamatnak a modellezésében elég nagy a bizonytalanság. A legfrissebb eredmények szerint - még egykristályos molibdén tükör alkalmazása esetén is - az élettartam biztosan kevesebb lesz két évnél. Mivel az egész port-modult biztosan nem lehet ilyen gyakran cserélni, az első tükröt egy hátulról kihúzható csőre rakják.

A 2. ábra a kék színnel jelölt kihúzható cső elhelyezkedését mutatja a port-modulon belül. Az ábrán zöld színnel feltüntetésre került a fény útja a periszkóp optikai labirintusán keresztül. Mivel a cső elfoglalja a helyet az optika útból, annak felépítése és elhelyezkedése kritikus az egész periszkóp tervezése szempontjából.

A kivehető cső az elnevezés által sugalltnál jóval bonyolultabb, 5 méter hosszú, 1 tonnás szerkezet. Két kritikus része van: a feje és a felfüggesztése.

A 3. ábrán látható csőfejet a port modul elülső részében pontosan dokkolni kell, hiszen ez tartja az optika első elemét, melyet nagyon pontosan kell pozicionálni az optikai rendszer többi eleméhez képest. A cső fejében az első tükör tartóján kívül még helyet kell biztosítani egy első tükröt védő redőnszerkezetnek és valószínűleg egy kalibrációs lámpának is.

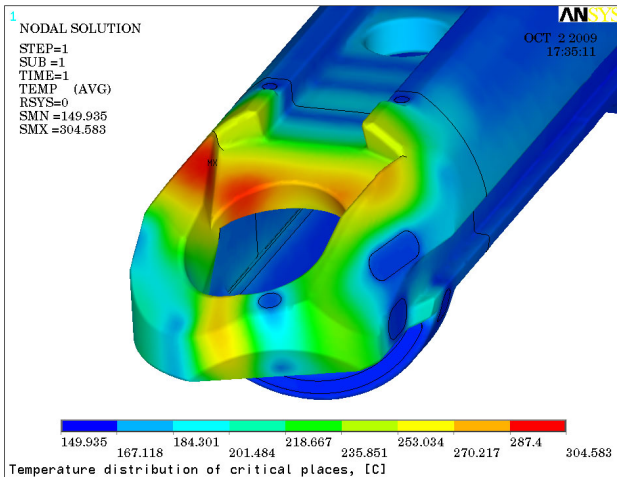
A kivehető cső oldható kötésekkel történő megfogására a port modul hátsó falán van lehetőség. Ennek a kötésnek elég erősnek kell lenni a gravitációs és elektromágneses terhelések elviseléséhez, de elég rugalmasnak is kell lennie a hőtágulásból eredő alakváltozás kiegyenlítéséhez. A fenti célok megvalósításának érdekében a cső hátsó részébe egy tengelyirányú hőtágulást kompenzáló karima került a 3. ábrán látható helyre.



2. ábra: Az ITER CXRS kivehető csővének elhelyezkedése a port modulban



3. ábra: A kivehető cső fejének és hátsó részének részletes tervei



4. ábra: A kivehető cső fejének hőtani szimulációja

Az ITER építése kapcsán állandó probléma, hogy a nagyenergiájú neutron- és gamma-sugárzás miatt a plazmától egész távol is számottevő a szerkezeti anyagok térfogati fűtése. Mivel a periszkóp vákuumban van, ennek a hőnek az elvezetése csak aktív hűtéssel valósítható meg. A vizes hűtés hűtőjáratai a jelenlegi elképzelések szerint a cső első 2,5 méteres szakaszában hosszlyuk fúrással lesznek kialakítva, mert így a hűtéshez szükséges hűtőjárat-sűrűség esetén sem csökken számottevően a szerkezet merevsége, és a hegesztések számát is minimalizálni lehet. Ezen kialakítással nem probléma az ITER előírások szerinti 40 bar nyomásállóság biztosítása sem.

A hűtés tervezését hőtani végelem szimuláció is segíti. A csőszerkezet tengelye mentén a térfogati hőfejlődés a plazmától való távolság függvényében az (1) képlet szerint exponenciálisan csökken.

$$H(x) = 2.4945 \exp(-0.0299 x) \text{ [W/cm}^3\text{]} \quad (1)$$

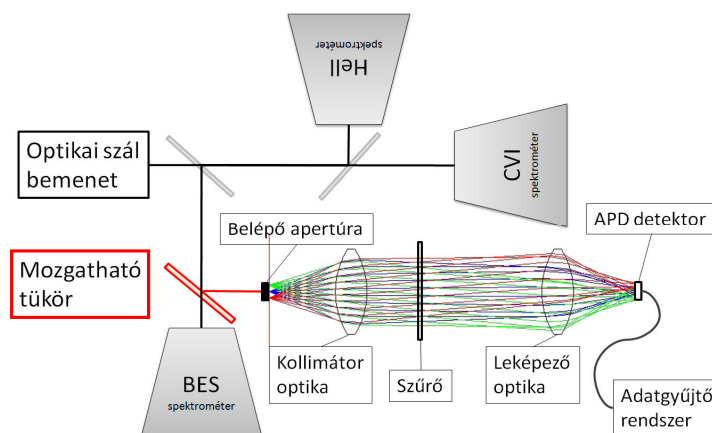
A hűtővízben a térfogati hőfejlődést Monte-Carlo szimulációk eredményét felhasználva számolták ki, maximális értéke  $0.615 \text{ W/cm}^3$ . Az első tükör környékén ezen felül számolni kell még az optika belépő apertúráján keresztül bejutó sugárzás szóródásából eredő  $1000 \text{ W/m}^2$  felületi hőterheléssel.

A szimuláció eredménye, hogy a víz  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ -os bemenő hőmérséklete a hűtőcsatornában összesen  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal emelkedik, és a csőben kialakuló maximális  $305 \text{ }^\circ\text{C}$  hőmérséklet a 4. ábrán látható fejrészen jelentkezik. Annak eldöntésére, hogy a csőben fellépő hőmérsékletkülönbség tolerálható-e, hátravan még a hőfeszültség és deformáció vizsgálata, valamint a hűtővíz áramlástanai szimulációja.

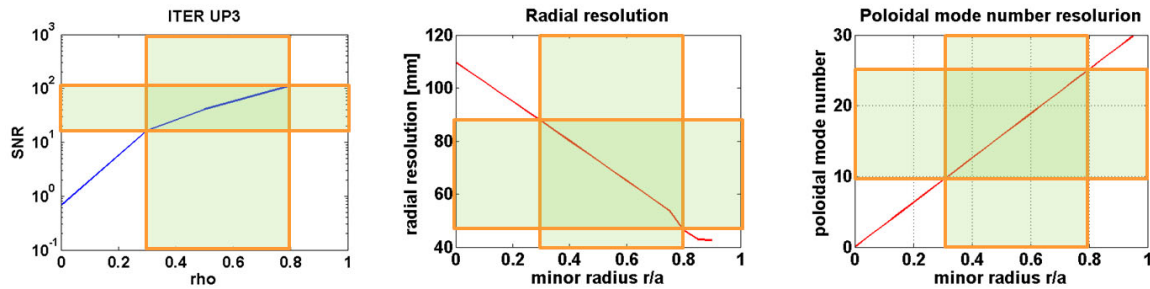
### Fluktuációs nyalábemissziós mérőrendszer integrálása a spektrométerekbe

A fúziós plazmák sűrűségfluktuációit két rendkívül fontos folyamat okozza. Az egyik a mágneses térre merőleges transzportot okozó turbulencia, a másik a plazmában fellépő magnetohidrodinamikai (MHD) módusok, amik többek között a fúziós reakcióban keletkezett nagyenergiájú  $\alpha$ -részecskék összetartását befolyásolják. A turbulencia által keltett sűrűségfluktuáció centiméteres térskálával és a plazma közepén maximálisan 1 %-os relatív amplitúdóval rendelkezik. Az MHD módusok térskálája nagyobb, 10 cm körüli, míg amplitúdójuk rendkívül széles skálán mozog. A jellemző frekvencia mindkét esetben pár 100 kHz.

A nyálábemissziós (BES) mérés során a plazmával való kölcsönhatás útján gerjesztett nyalábatomok karakterisztikus hullámhosszú, spontán emisszióját vizsgáljuk. A fluktuációs mérés esetén ezt jó időfelbontással kell megtenni, így a CXRS berendezésekbe hagyományosan telepített spektrométerek alkalmazása nem megoldható.



5. ábra: Modellezett fluktuációs BES mérés



6. ábra: A javasolt fluktuációs BES mérés jel/zaj viszonya és térbeli felbontása a normált kis sugár függvényében

Az 5. ábra a CXRS spektrométerbe integrált fluktuációs BES mérés általunk vizsgált elrendezésének elvi vázlatát mutatja. A spektrométerbe a nyaláb egy adott szakaszából optikai szálakon érkező fényt spektrális szűrőkkel szétbontjuk, és gyakorlatilag három különböző spektrométerbe vezetjük. A HeII és CVI spektrométerek a hélium és a szén egy-egy kiválasztott vonalát bontják fel nagy pontossággal, míg a BES spektrométer a nyalábbemisszió spektrális felbontását végzi. Mivel a fluktuációs méréshez is a BES csúcst használjuk, a fényt a BES ágban elhelyezett mozgatható tükörrel térítjük el. A fluktuációs mérőegységbe beérkező fény egy kollimátor optika után egy finoman behangolt keskenysávú interferencia-szűrőre jut. Ezen szűrő feladata, hogy minél több BES fény átengedése mellett kiszűrje a zavaró spektrumkomponenseket. Végül a szűrt fényt egy gyors lavinadióda (APD) detektorra képezzük.

Első feladatként a SimulationOfSpectra CXRS szimulációs programcsomaggal [3,5] a szűrőre a nyaláb különböző szakaszaiból érkező spektrumokat modelleztük. Azt tapasztaltuk, hogy a nyalábatomok mozgásából eredő Doppler-eltolódás hatására a BES vonalak a  $\rho = r/a > 0,3$  normált küssugár tartományban válnak el a plazma széléről jövő karakterisztikus sugárzástól, ahol  $r$  a kis sugár és  $a$  a legkülső zárt fluxusfelület kis sugara. A spektrális szűrés tehát ebben a tartományban lehetséges. A csatornánként optimalizált interferencia-szűrőkön áteresztett spektrumokat hullámhossz szerint integrálva, a megfigyelőrendszer Etendue-jével és az optikai elemek transzmissziójának szorzatával megszorozva megkapjuk a detektorra érkező intenzitást. Ezen intenzitás alapján a fotonok emisszióját Poisson-folyamatnak modellezve és egy 1 MHz sávzélességű

APD detektor elektronika zajerősítését figyelembe véve [6] megkapjuk a várható jel-zaj viszonyt (SNR).

A 6. ábrán a jel-zaj viszony értékét a nyaláb 40 mm-es hosszáról minden spektrométerbe érkező fényt egyetlen APD detektorra képezve becsültük meg. A  $0,3 < \rho < 0,8$  radiális tartományon az elérhető SNR 10 és 100 között van, ami egy hosszú stacioner szakaszokkal rendelkező ITER kisülés esetén elégséges az 1% körüli amplitúdójú hullámok kimutatására.

A mérés térbeli felbontását a nyaláb és a periszkóp geometriája határozza meg. A 6. ábrán látható radiális és poloidális irányú felbontás ábrákból az a következtetés szűrhető le, hogy a turbulencia térbeli skálájánál rosszabb a felbontásunk, tehát azt nem tudjuk mérni, de az ITER működése szempontjából kritikus MHD módusokat tudjuk [4].

Az ígéretes szimulációs eredmények hatására elkezdődött egy fluktuációs mérőrendszer integrálása az épülő ITER prototípus spektrométerbe, amit a TEXTOR és esetleg a JET tokamakokon fognak tesztelni. A prototípuson szerzett tapasztalatok szükségesek annak eldöntéséhez, hogy az ITER-en működhet-e egy ilyen irányú bővítése a CXRS diagnosztikának.

## Összefoglalás

Az ITER tokamak plazmaközepi töltéscsere diagnosztikájának fejlesztésében számottevő a magyar szerepvállalás. Az első tükör cseréjét lehetővé tevő cső szerkezet mechanikai és hőtechnikai tervezését az KFKI RMKI és a BME mérnökei végzik, és magyar kezdeményezésre szimulációk és prototípusok segítségével vizsgáljuk a CXRS rendszer lehetséges bővítését fluktuációs atomnyaláb-emissziós méréssel.

## Irodalomjegyzék

- [1] ITER Physics Basis Editors, ITER Physics Expert Groups, ITER Joint Central Team, and Physics Integration Unit. ITER Physics Basis. Nuclear Fusion, 39(12), 2137–2638, (1999).
- [2] K. Ikeda, et. al. Progress in the ITER Physics Basis. Nuclear Fusion, 47(6), (2007).
- [3] K R. Jaspers, M.G. von Hellermann, E. Delabie, J. Koning, W. Biel, S. Sadakov, Y. Krasikov, M.di Maio, O. Neubauer, A. Litnovsky, G. Offermanns, P. Bourauel, V. Kotov, O. Marchuk, B. Snijders, F. Klinkhamer, J. Hopman, T. Baross, N. Hawkes, M. Stamp, K. Patel, M.O'Mullane, and A.Hogenbirk. ITER Core CXRS Project, EFDA task TW-TPDS-DIADES, Final report. ITER Core CXRS Cluster (2009).
- [4] G. Pokol and S. Zoletnik. Application of BES for MHD and turbulence investigations. In Workshop on Active Beam Spectroscopy for control of the fusion plasma, Leiden, 24 - 27 March 2009.
- [5] M. von Hellermann, S. Brons, R. Jaspers, and O. Neubauer. FOM Coordination Report on Core CXRS, EFDA 5.1b Contract 04-1211, deliverable 3.1. FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, (2005).
- [6] D. Dunai, S. Zoletnik, J. Sarkozi, and A.R. Field. Avalanche photodiode based detector for beam emission spectroscopy. Review of Scientific Instruments, submitted, (2009).