

Kriogenika, a fúziós berendezések egyik kulcstechnológiája

Walcz Erik

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

BME Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Technológiai fejlődésünk egyre inkább megköveteli a szélsőségesen alacsony, illetve magas hőmérsékletek előállításának képességét és azok kezelését. Nincs ez másképp a fúziós berendezések esetében sem, ahol az univerzum legnagyobb hőmérsékletgradiensét állítjuk elő a közel 150 millió Kelvin hőmérsékletű plazma és az a körül elhelyezkedő, közel 4 K hőmérsékletű szupravezető mágnesetekercsek között. A cikk a fúziós berendezések kriogén (<120 K) hűtést igénylő berendezéseit és azokkal kapcsolatos magyar kutatási irányokat kóciójára bemutatni.

Bevezetés

A fúziós berendezések nagy hányada rendelkezik önálló kriogén infrastruktúrával a berendezés működtetéséhez szükséges alrendszerek kriogén folyadékokkal (többnyire folyékony hélium) történő ellátására. Ezen infrastruktúra egy külön üzemet jelent, amely a kriogén folyadékok eljuttatásán felül azok visszahűtéséért (ha nincs fázisátalakulás, pl. szuperkritikus héliumhűtés), cseppfolyósításáért felel.



1. ábra: Az ITER berendezés kriogén üzeme bentről (fent) és légi nézetből (lent) [1]

A Dél-Franciaországban épülő ITER kísérleti fúziós berendezés kriogén üzemének (1. ábra) méretéből is látható, hogy egy ilyen, erőmű méretű kísérleti reaktor esetében ezen infrastruktúrák nem elhanyagolhatók, méreteiben

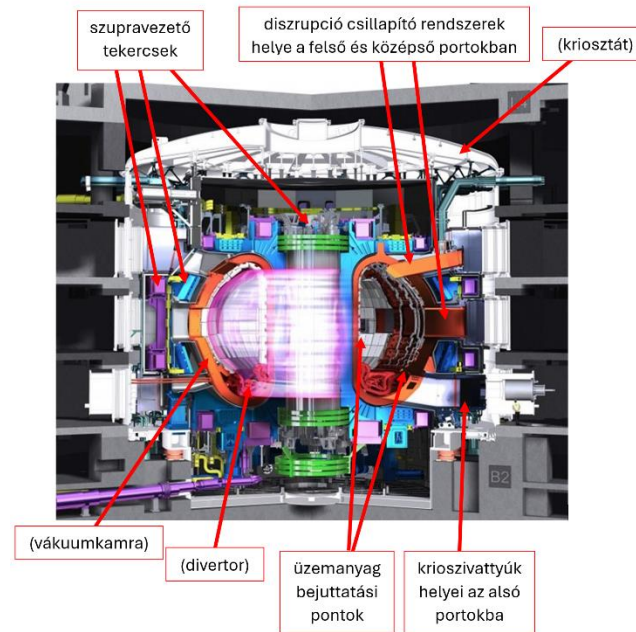
összemérhető magával a reaktorépülettel. Az alábbi felbontás az ITER berendezést veszi alapul, és a rendszerek nagy része azon keresztül kerül bemutatásra, azonban nagy részük általános képet ad más berendezések hasonló rendszereiről.

Kriogén hűtésű alrendszerek

Egy TOKAMAK típusú fúziós berendezés fontosabb kriogén hűtést igénylő alrendszerei az alábbiak:

- Szupravezető tekercsek
- Krioszivattyúk
- Diszrupció csillapító rendszer és folytonos pelletbelövés

Az ITER kriogén infrastruktúrája a világ egyik legnagyobb egybefüggő rendszere lesz 75 kW hűtési teljesítménnyel 4,5 K hőmérsékleten (hélium) és 1300 kW hűtési teljesítménnyel 80 K-en (nitrogén). A CERN LHC után ez lesz a valaha épített legnagyobb kriogén rendszer. [2]



2. ábra: A TOKAMAK kriogén hűtést igénylő főbb berendezései

Szupravezető tekercsek

A fúziós berendezések elengedhetetlen elemei a szupravezető tekercsek, amelyek alapvető feladata a mágneses tér létrehozása és fenntartása, amely összetartja, formálja és stabilizálja a plazmát. A TOKAMAK típusú fúziós reaktoroknál, mint például az ITER, a következő szerepeket töltik be:

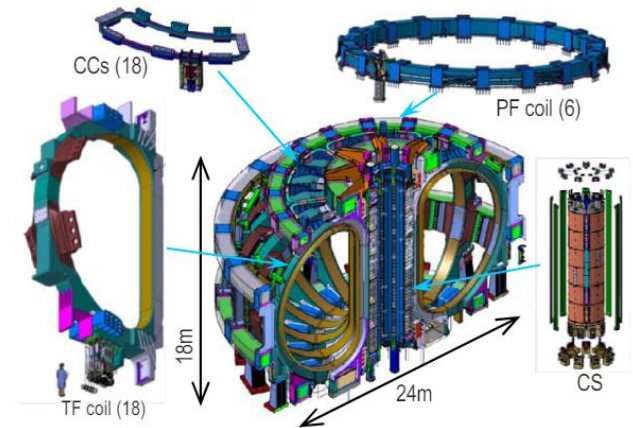
Toroidális tér (TF) tekercsek: Létrehozza a toroidális mágneses mezőt, amely a plazmát összetartó mágneses tér fő komponense.

Központi szolenoid (CS): Feladata a plazmában lévő áram indukálása. A plazmaáram által keltett mágneses tér és a toroidális mágneses tér összege hozza létre azt a csavart mágneses térszerkezetet, amely szükséges a plazma stabil összetartásához.

Poloidális tér (PF) tekercsek: Feladatuk a függőleges és radiális mágneses tér létrehozása, amely a plazma stabilizálását és formálását végzi.

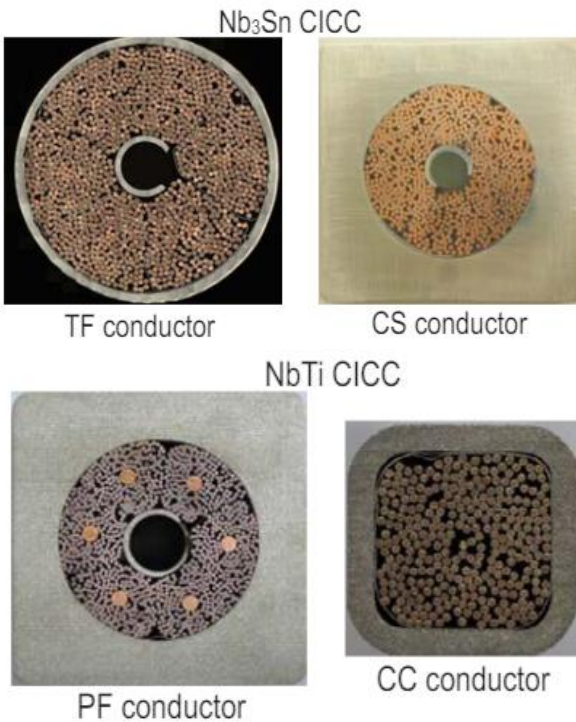
Korrigáló tekercsek (CC): Kisebb tekercsek, amelyek feladata, hogy korrigálják a berendezés megépítésének toleranciájából származó szimmetria hibákat.

(HTS), amelyek vagy magasabb hőmérsékleten vagy nagyobb mágneses téren üzemeltethetők. Ezek használatával épülnek jelenleg az első nagyobb mágneses fúziós berendezések. Ahhoz, hogy a szupravezetést elérjük, rendkívül alacsony, 4K körüli hőmérsékletre kell hűtenünk a tekercseinket (modernebb HTS tekercsek esetén is ~20-70 K), ami ilyen nagyberendezések komponenseinek esetén óriási hűtőteltjesítményt igényel.



4. Az ITER szupravezető mágnesetekercsei [3]

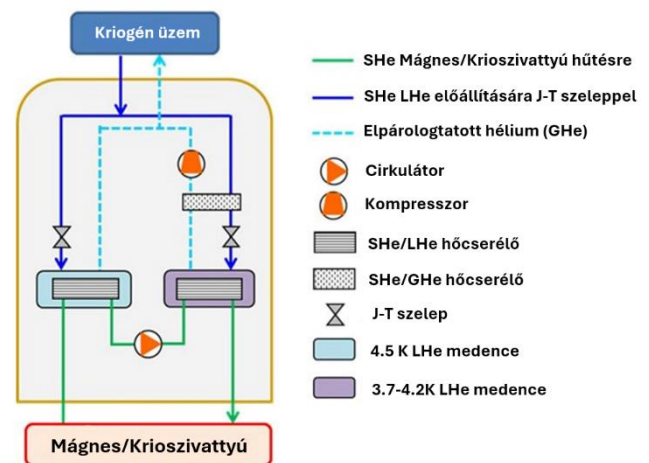
Az ITER esetében a két legnagyobb „fogyasztó” a mágnesrendszer és a krioszivattyúk. Ezek hűtését, az 5. ábra szerint, kriogén üzem látja el ún. szuperkritikus nagy nyomású héliummal (SHe), amelyet az üzemből a berendezés közelében Joule-Thomson szelepeken keresztül expandáltatnak, azt tovább hűtve, és egy alacsonyabb hőmérsékletű cseppfolyós hélium (LHe) medencét hoznak létre. Ebben a medencében lévő hőcserélőkön keresztül hűtik vissza azt a szeparált szuperkritikus héliumkört, amely közvetlenül a mágnesetekercset és a krioszivattyút látja el. Ezekben a fogyasztókban a szuperkritikus hélium-hűtőközeg nem szenved fázisátalakulást, csak hőmérséklete növekszik.



3. ábra: Az ITER különböző szupravezetőinek keresztmetszete [3]

Az ITER-ben használt szupravezetők Nb₃Sn (nióbiium-ón) és NbTi (nióbiium-titán) szálabokból állnak, ahogy az a 3. ábrán látható. Ezeket a szálatat rézvezetékekkel kombinálva bonyolult kötegbe rendezik, majd speciális burkolatokba helyezik. Ezekből a kábelekből hozzák létre a különböző tekercset. A toroidális tekercsekben nagyobb mágneses tér van, melyen csak a Nb₃Sn anyag marad szupravezető. A polidális tekercsek helyén kisebb a mágneses tér értéke, ezért olcsóbb NbTi anyag használható. Az összeállított tekercsek a 4. ábrán láthatók.

Meg kell jegyezni, hogy az elmúlt évtizedben fejlett ipari technológiaként jelentek meg a magas hőmérsékletű szupravezető anyagok (High Temperature Superconductor,

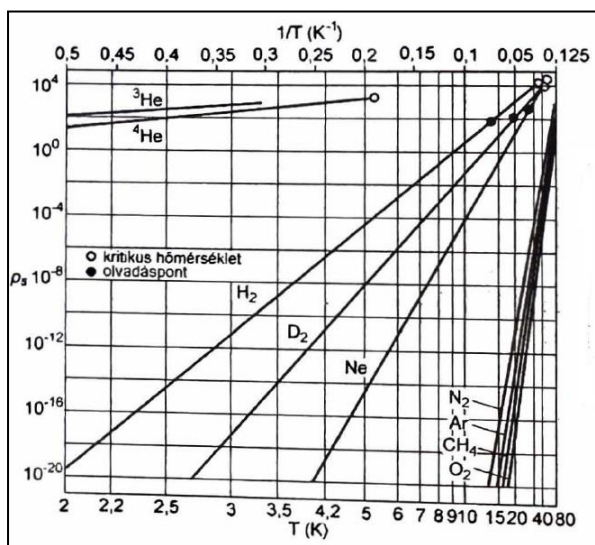


5. ábra: Az ITER mágnesetekercs és krioszivattyú hűtési elve [2]

Krioszivattyúk

A krioszivattyúk a legtisztább vákuumszivattyúk, amelyeknek extrém nagy szívósebessége is lehet, a gázokat hideg felületekre kondenzálják (deszublímálják), ahol azok szilárd fázisba mennek át. Ezen berendezések

elengedhetetlenek a fúziós berendezésekben szükséges vákuum előállításához. Az elérhető végvákuum a kondenzált anyag gőznyomásának függvénye (6. ábra), amely rendkívül alacsony, ultranagy-vákuum ($p < 10^{-8}$ mbar) tartománybeli lehet. A kriocsapdázás során a kondenzációval keletkező gázok a hideg felületre ütközve csapdába esnek. Egy magasabb forráspontú kísérőgáz kondenzációja során alacsonyabb forráspontú gázokat is magával ragad és a hideg felületen kondenzálva tartja. Ezzel a módszerrel a gázkeverékben lévő alacsonyabb forráspontú gázok parciális nyomása is jelentősen csökkenthető. A krioszorpciós szivattyúk porózus anyagokat, például aktív szenet használnak, amelyek nagy felületükkel és alacsony hőmérsékletükkel képesek adszorbeálni a gázokat. [4]



6. ábra: Néhány gáz telítési gőznyomása a hőmérséklet függvényében [4]

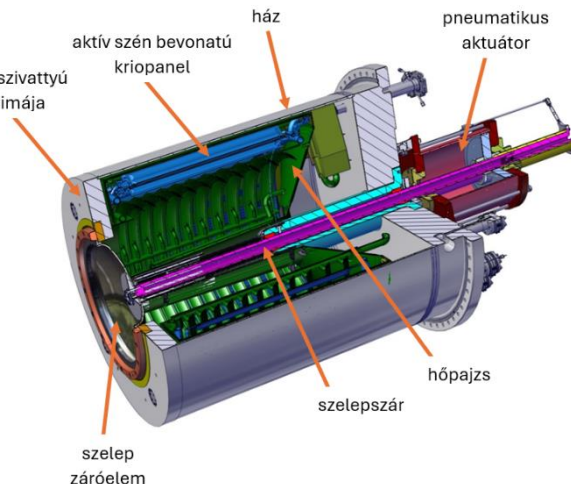
A krioszivattyúk hátrányai közé tartozik, hogy regenerálásra van szükségük, tehát a folyamatos szivóteljesítmény fenntartásához – a felmelegítés, tisztítás, visszahűtés idejét figyelembe véve – a kívánt kapacitás 2-3-szorosát kell beépítenünk. A regenerálás során a szivattyút felmelegítik, és a felszabadult gázokat elszívják, ügyelve arra, hogy a krioszivattyú ne szennyeződjön. A 7. ábra egy fúziós berendezéshez tervezett krioszivattyút mutat, amely gyakorlatilag egy nagy szelepházba (szivattyú leválasztása érdekében a regeneráláshoz) foglalt aktív szentes kriopanelt jelent.

Diszrupció csillapító rendszer

A diszrupció

Diszrupciónak nevezik azt a plazma instabilitást, amikor a TOKAMAK-ban instabillá válik a plazma, és hirtelen (ezredmásodperc alatt) elveszti a benne tárolt termikus energiát. Az instabilitás hajtóereje a nagy plazmaáram, ezért nincs diszrupció sztellarátorokban. Bár a gyors hűlés miatt a plazma vezetőképessége gyorsan lecsökken, a plazmaáram az önindukció miatt nem tud gyorsan csökkenni. Az önindukció nagy toroidális irányú elektromos teret kelt, amely elektronokat gyorsíthat fel nagy energiára, melyeket elfutó elektronoknak nevezünk (runaway electrons). Ezek több megaelektronvoltage energiájú és több MA áramú nyalábbá fókuszálódhatnak.

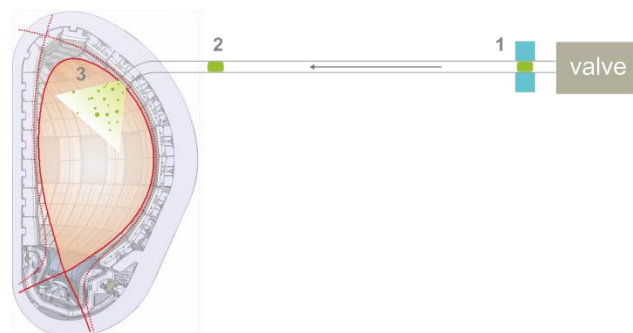
A plazma gyors energiavesztése, de még inkább az elfutóelektron-nyaláb esetleges lokális fűtőhatása kárt tehet a belső falban, vagy akár a belső borítás (plasma-facing component) mögött elhelyezkedő vízűtés csöveiben, ami ezáltal vízbetöréshez vezetne. A plazmaközei szerkezetekben megjelenő jelentős áramok az állandó toroidális térrel nagy erőt keltenek a szerkezeti elemekben, ami mechanikai károsodáshoz vezethet. [6]



7. ábra: Az ITER berendezés krioszivattyúja (D=1.6m, L=3.3m) [5]

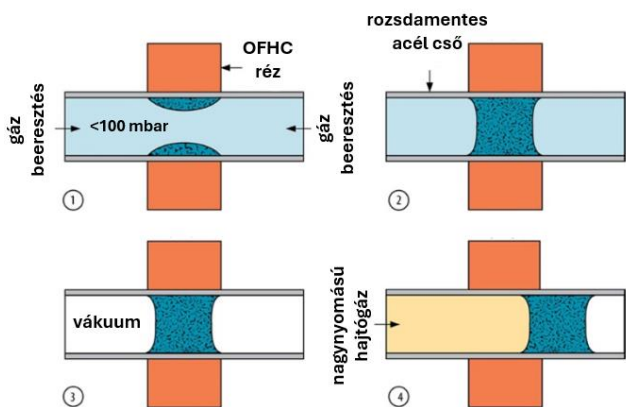
Diszrupció csillapítása (SPI)

Nagyobb TOKAMAK berendezésekben ezen diszrupciós jelenség enyhítésére (mindamellett, hogy a csillapítatlan diszrupció is tervezési körülmény) az ún. SPI (Shattered Pellet Injector) technológia nyújt megoldást, amely szobahőmérsékleten gáz-halmazállapotú anyagok kriogén hőmérsékleten történő „kifagyasztását”, azok puskagolyó szerű kilövését és a plazmába érést megelőzően apróbb darabokra történő fragmentálását foglalja magában. (8. ábra).



8. ábra: Pelletgyorsítás, -törés és -bejuttatás a TOKAMAK plazmájába [7]

A pellet (szilárd halmazállapotú kriogén „lövedék”) mozgási energiája, illetve a maradék hajtógáz lévén ez a „jég”-gáz elegy egyfajta spray-ként a plazma mélyére hatol és ott ablálódik (szilárd halmazállapotból gázneművé válik), ezzel hűtve azt, és elősegítve a plazmában tárolt energia egyenletes lesugárzását a berendezés falára, megakadályozva a berendezés károsodását.



9. ábra: A pelletformálás lépései [7]

A pelletformálás módszere, hogy egy jellemzően rozsdamentes acélcsőben in situ elkészítjük a pelletünket úgy, hogy abba alacsony nyomáson beengedjük a kívánt gázt, miközben a cső egy szegmensét a gáz hármasponti hőmérséklete alatt tartjuk (pl. $\text{H}_2 <13\text{ K}</math>) egy az acélcsőre kontaktált jó hővezetési képességű oxigénmentes réz blokkal (OFHC Copper - oxygen-free high thermal conductivity), miközben a réz blokkot kriogén hűtővel, vagy folyékony hélium átvezetéssel hűtjük. (9. ábra) [6] Az ITER berendezés esetében nagy, eddig még nem használt 19 és 28,5 mm átmérőjűek lennének ezek a pelletek, melyeknek a hossza az átmérő kétszerese. Elsősorban tiszta H_2 , D_2 , Ne pelletek és néhány százalékban neonnal kevert hidrogén (prócium) pelletek belövése a cél. A hűtés tekintetében a rozsdamentes kilövő csőre vákuumban történő keményforrasztással rögzítik a réz blokkot, amelyben szuperkritikus héliumot áramoltatnak, vagy egy hosszas galvanizálási eljárással növesztik rá a réz struktúrát.$

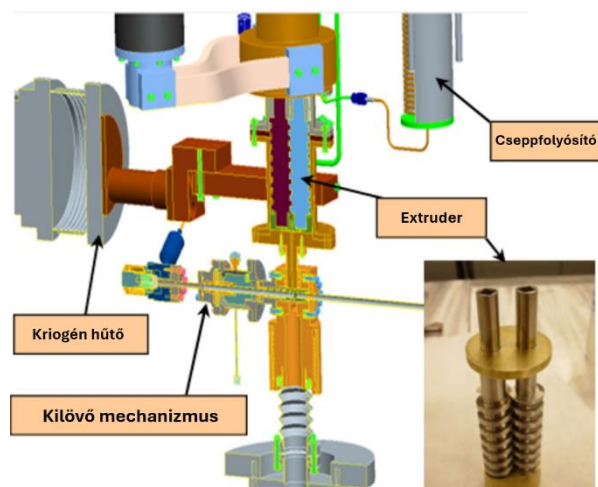
Folyamatos üzemű pelletbelövés

A fúziós berendezés üzemanyagának bejuttatása az SPI rendszerekhez hasonlóan pelletek belövésével valósítható meg azzal a különbséggel, hogy míg az SPI rendszerek kvázi „egylövetű” berendezések, amelyekben a nagyobb, $>10\text{ mm}</math> átmérőjű pelletek várakoznak a vezérlőrendszer jelzésére, addig az üzemanyagellátásra folyamatos üzemű ($>10\text{ Hz}$ frekvenciával) kisebb méretű, néhány milliméter átmérőjű pellet belövésére van szükség, illetve ezek bejuttatása a plazmába egyben történik, nem pedig darabokra törve.$

Az üzemanyag-bejuttatáson felül, ezek a belövők használatosak nemesgáz-pelletek belövésére is, amelyek szintén a berendezés védelme érdekében az ún. divertor elemek hőterhelését/erózióját hivatott csökkenteni (ezek ma már kevésbé használatosak), továbbá a plazmaszél-turbulencia és ezáltal a kifelé irányuló részecske- és energiátaszport befolyásolható kisebb méretű, nagyobb frekvenciájú pelletbelövésével (ELM pacing).

Folyamatos üzemanyag-bejuttatásra jelenleg két fő megoldás áll rendelkezésre. Mindkettőben közös, hogy egy csavaros extruderben történik az anyagok fagyasztása többnyire egy azt megelőző előhűtés vagy cseppfolyósítást követően. A csavarorsó feladata az, hogy a szilárd halmazállapotú anyagokat kisajtolja/extrudálja kör alakú vagy négyzög keresztmetszetre. Az extrudáláshoz megfelelő hőmérsékletű „jégre” van szükségünk az optimális anyagszilárdság elérése érdekében. Az extrudálás

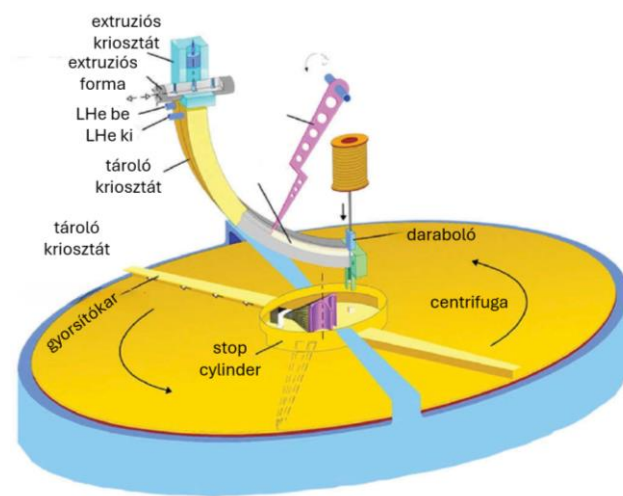
során több tényezőtől függő hőfejlődés történik különböző részeken, az egyik ilyen a kilépő nyílás geometriai kialakítása.



10. ábra: Csavaros extruder kivágó és gázhajtású kilövő mechanizmussal [8]

Ezt követően a folyamatosan extrudált „jégrúd” darabolása és kilövése tekintetében két fő megoldás létezik. A 10. ábrán láthatjuk azt, amely esetében az extrudálás irányára merőlegesen egy elektromágnessel mozgatott vékonyfalú cső, mint kivágó szerszám néhány milliszekundum alatt kivágja a pelletet a folyamatosan extrudált anyagból, miközben a mögötte elhelyezkedő elektromágneses működtetésű gyorszelep kinyit és a nagynyomású hajtógáz kilövi a pelletet.

A másik megoldás esetén az extrudált anyagot csak darabolni kell (nem kivágni belőle), amikor az így létrejövő pelletek egy centrifugába esnek, ahol a centrifugális erő hatására, a gyorsítókaron kifelé haladva (11. ábra) nyeri el a pellet a kezdeti kinetikus energiáját. Előnye, hogy ha a centrifugakarba történő bejuttatást geometriai korlátok révén a kar pozíciójához tudjuk kötni, akkor kisebb sebességszórást érhetünk el a pelletsebességek tekintetében, mint a hajtógázzal gyorsított pelletek esetében, valamint a pellet gyorsítása nem jár gázáramlással, amit el kell vonni a plazmába lövés előtt.



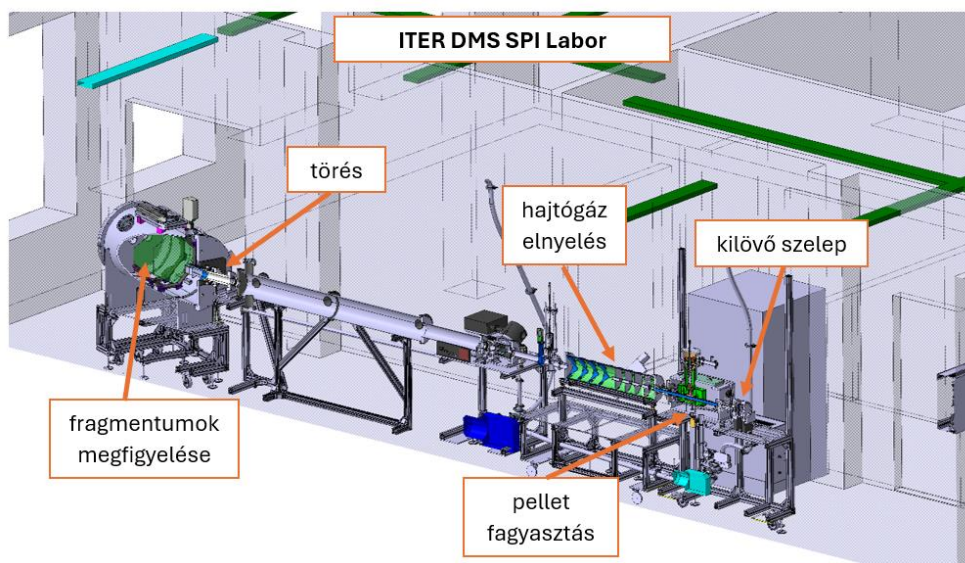
11. ábra: Az ASDEX pellet centrifuga elvi ábrája [9]

A kutatások magyar vonatkozásai

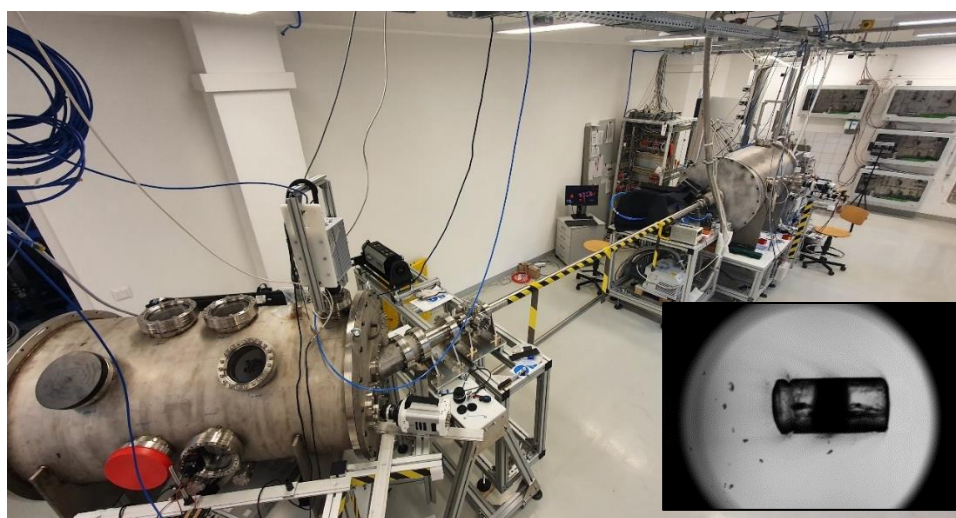
A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Fúziós Plazmafizika Laboratóriumában 2020 óta intenzíven folynak kriogén vonatkozású kutatások, amelyek azzal indultak, hogy az ITER Diszrupció csillapító rendszer (ITER DMS SPI) támogató laboratóriumává vált. Ennek keretében egy új laboratóriumi egység és berendezés épült (12. ábra és 13. ábra) [10], amelynek feladata a technológia továbbfejlesztése az ITER számára. A fejlesztések fő iránya a pelletek elkészítésének módjára, kilövést követő megfigyelésére és törést követően a fragmentumok vizsgálatára (méret, sebesség, szóródás) fókuszál. A berendezés megépítése és üzemeltetése során szerzett tapasztalatok alapján a kriogenika így új kutatási irányként jelent meg.

Az SPI laboratórium rugalmas működtetését a KFKI Campus hélium cseppfolyósítója teszi lehetővé mindamellett, hogy a laboratórium a cseppfolyós üzemi legnagyobb hélium felhasználója kísérleti napokon ~100l felhasználással. Ezzel a laboratórium hozzájárul a más alapkutatásokban is nélkülözhetetlen telephelyi cseppfolyósító infrastruktúra fenntartásához.

Az SPI laboron felül új, elsősorban fúzióhoz kapcsolódó kriogén irányként a labor részt vesz a jövő európai demonstrációs erőművének (EU DEMO) üzemanyagellátó pellet extruderének és centrifugájának fejlesztésében, az ahhoz kapcsolódó kísérletekben. További kutatási irányként jelenik meg a hidrogén katalitikus orto-pára átalakításának vizsgálata, 3D nyomtatott anyagok kriogén hőmérsékleten történő alkalmazhatóságának lehetőségei, kriogén pelletek deszublímációjának numerikus, áramlási modellezése.



12. ábra: Az EK FPL-ben üzemelő SPI Labor CAD ábrája [10]

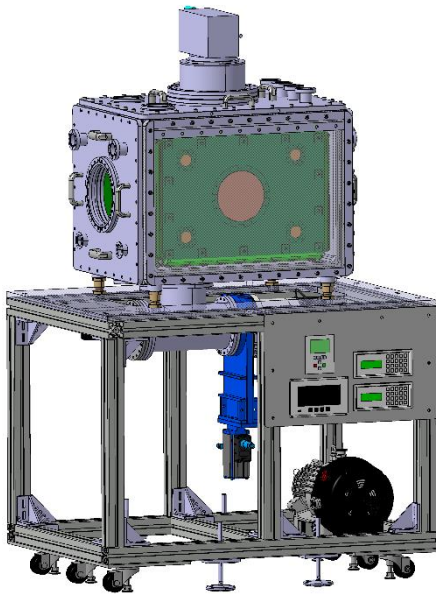


13. ábra: Az EK FPL-ben üzemelő SPI Labor korábbi fotója és egy pellet képe (jobb alul) [10]

Ezen új irányok szükségessé tették új kutatási infrastruktúra fejlesztését (CryPT-ON berendezés, 14. ábra), amelynek keretében a laboratórium egy moduláris vákuumkamrát épített, amelyben zártláncú kriogén hűtő és folyékony hélium/nitrogén hűtésre egyaránt lehetőség nyílik ezzel maximalizálva a kompatibilitást a jövőben felmerülő kísérleti ötletekkel.

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy a kriogén technika elengedhetetlen napjaink és vélhetően a jövőbeli fúziós

berendezéseink számára. Komplex rendszerekben, különféle hűtési megoldásokkal használunk kriogén folyadékokat. Az ITER számaiból is látható, hogy egyre nagyobb hűtési és cseppfolyósítási kapacitásokra van szükségünk, miközben a kriogén folyadékok széles alkalmazási területtel rendelkeznek nem csak a tudományos kutatások területén.



14. ábra: A CryPT-ON berendezés CAD ábrája (bal) és a nyitott kamra (jobb)

Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.iter.org/construction/Cryoplant>
- [2] <https://www.iter.org/mach/Cryo>
- [3] N. Koizumi, Progress of ITER Superconducting Magnet Procurement, Physics Procedia, Volume 45,2013,Pages 225-228,ISSN 1875-3892, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.05.008.v>
- [4] Bohátka, S. (2015). Vákuumfizika és -technika. 2. átdolgozott kiadás. Budapest: Eötvös Loránd Fizikai Társulat (ELFT)
- [5] <https://www.iter.org/newsline/-/3029>
- [6] Walcz Erik: Magfúzióhoz kapcsolódó diszrupció csillapító kísérleti berendezés tervezése és szabályozása
- [7] S. K. Combs and L. R. Baylor: Pellet Injector Technology – Brief History and Key Developments in the Last 25 Years, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA
- [8] Maruyama, S., Yang, Y., Pitts, R.A., Sugihara, M., Putvinski, S., Li, B., Li, W., Baylor, L.R., Meitner, S.J., Day, C., LaBombard, B., & Reinke, M. (2010). ITER Fuelling System Design and Challenges - Gas and Pellet Injection and Disruption Mitigation (IAEA-CN--180). International Atomic Energy Agency (IAEA)
- [9] S. K. Combs & L. R. Baylor (2018): Pellet-Injector Technology – Brief History and Key Developments in the Last 25 Years, Fusion Science and Technology, DOI: 10.1080/15361055.2017.1421367
- [10] Zoletnik, S., Walcz, E., Jachmich, S., Kruezi, U., Lehnen, M., Anda, G., ... Vécsei, M. (2023). Shattered pellet technology development in the ITER DMS test laboratory. FUSION ENGINEERING AND DESIGN, 190. <http://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113701>