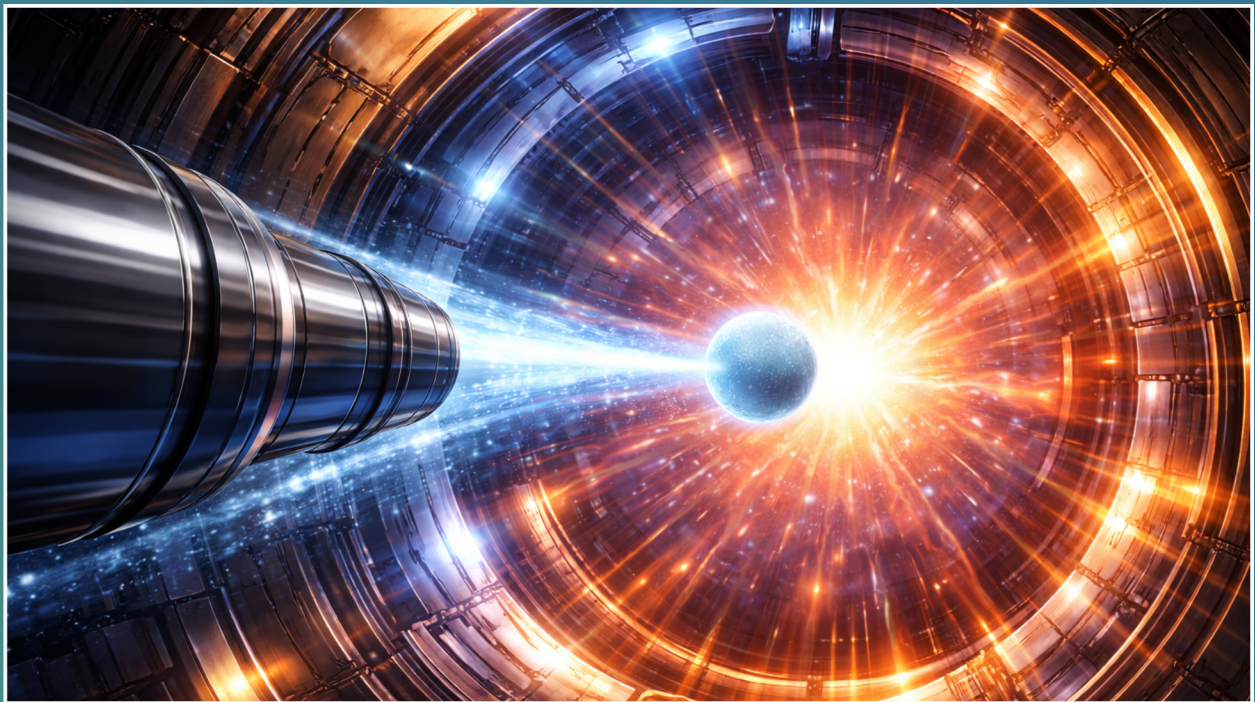


2025. DECEMBER

XVIII. ÉVFOLYAM, 2. SZÁM

NUKLEON

NUKLEÁRIS TUDOMÁNYOS MŰSZAKI FOLYÓIRAT



Avulásmenedzsment-tevékenység bevezetése a Paksi Atomerőműben
Kriogén extrúzió: kulcstechnológia a fúziós berendezések folyamatos
üzemanyag-utánpótlásában

Optikai diagnosztikai rendszerek fúziós erőművekben

MEGJELENIK A MAGYAR NUKLEÁRIS TÁRSASÁG GONDOZÁSÁBAN | NUKLEARIS.HU

NUKLEON

NUKLEÁRIS TUDOMÁNYOS MŰSZAKI FOLYÓIRAT

Főszerkesztő:

Hadnagy Lajos

Szerkesztőbizottság:

Barnaföldi Gergely Gábor

Cserhádi András

Czibolya László

Kocsis Gábor

Neubauer István

Nős Bálint

Pázmándi Tamás

Radnóti Katalin

Yamaji Bogdán

Szerkesztőség:

Postacím:

Magyar Nukleáris Társaság

Fábián Margit titkár

MTA EK

1525 Budapest Pf. 49.

Telefon: 36-1-392-2222/1965

e-mail:

szerkeszto@nuklearis.hu

foszerkeszto@nuklearis.hu

Olvasószerkesztő:

Amberboy-Kiss Virág

Technikai szerkesztő:

Székely Levente Csaba

Címlapkép:

OpenAI ChatGPT

Kiadja a

Magyar Nukleáris Társaság

Felelős kiadó:

Pokol Gergő

Hirdetésfelvétel:

hirdetes@nuklearis.hu

nuklearis.hu

ISSN: 1789-9613

Tartalom

266

Balogh Sára, Dr. Gyöngyösi Petra, Dr. Vajna Zoltán, Hum Zoltán

Avulásmenedzsment-tevékenység bevezetése a Paksi Atomerőműben

267

Longauer Bence

Kriogén extrúzió: kulcstechnológia a fúziós berendezések folyamatos üzemanyag-utánpótlásában

268

Katona Imre, Dr. Nagy Balázs Vince

Optikai diagnosztikai rendszerek fúziós erőműveken

NUKLEON

NUKLEÁRIS TUDOMÁNYOS MŰSZAKI FOLYÓIRAT

Abstracts

266 *Sára Balogh, Dr. Petra Gyöngyösi, Dr. Zoltán Vajna, Zoltán Hum* Introduction of Obsolescence Management Activities at the Paks Nuclear Power Plant

In order to ensure the supply of equipment necessary for the continuous nuclear energy production of the Paks Nuclear Power Plant, we have developed a methodological framework to identify obsolete equipment and support obsolescence management activities.

267 *Bence Longauer* Cryogenic Extrusion: A Key Technology in Continuous Fuelling of Fusion Devices

Cryogenic extrusion of hydrogen isotopes (protium, deuterium, tritium) is a key technology for the continuous fuelling of fusion devices with magnetic confinement. Among available methods, pellet injection offers superior fuelling efficiency due to deeper plasma penetration. This paper presents the evolution of cryogenic extruders from single-shot systems to advanced twin-screw designs, highlighting their operational principles, thermal management challenges, and the complex rheology of hydrogen isotopes at cryogenic temperatures.

268 *Imre Katona, Dr. Balázs Vince Nagy* Optical diagnostic systems in fusion power plants

The European Union's (EU) long-term fusion energy strategy envisions the development of a demonstration fusion reactor (DEMO) as a technological bridge between the experimental ITER device and future commercial fusion power plants. According to current plans, DEMO is expected to deliver net electrical power to the grid by the middle of the 21st century. In addition to this primary objective, it must achieve tritium self-sufficiency, demonstrate safe operation, and showcase the potential for economically viable performance. The current baseline concept for the EU DEMO is a tokamak-type fusion reactor. Compared with existing fusion devices, the power-plant environment will impose orders-of-magnitude higher thermal and radiation loads on the components operating in the immediate vicinity of the plasma. Consequently, the diagnostic systems required for monitoring and controlling the device must be highly reliable and resilient. Among the various types of plasma diagnostics, optical diagnostics represent one of the most critical challenges in terms of design and integration.

The aim of this paper is to present the expected optical diagnostic systems, their challenges and potential solutions, as well as the related Hungarian research objectives.

Avulásmenedzsment-tevékenység bevezetése a Paksi Atomerőműben

Balogh Sára, Dr. Gyöngyösi Petra, Dr. Vajna Zoltán, Hum Zoltán

MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
7030 Paks, hrsz.: 8803/17.

A Paksi Atomerőmű folyamatos nukleáris energia termeléséhez szükséges berendezések ellátásának biztosítása érdekében módszertani keretrendszert alakítottunk ki az elavult berendezések azonosítása, az avulásmenedzsment tevékenység támogatása céljából.

Bevezetés

Napjainkban jelentős problémát okoz a nukleáris iparban a berendezések életkorából és egyediségéből adódó elavultsággal kapcsolatos nehézségek kezelése. Elavultnak tekintünk egy berendezést vagy terméket, amennyiben azt a piacon már nem gyártják, vagy annak beszerzése, majd minősítése nehezen kivitelezhető [1].

A Paksi Atomerőmű a További Üzemidő Hosszabbítás Kiemelt Projekt előkészítése során elvégezte a rendelkezésre állási mutatók vizsgálatát, amelynek eredménye, valamint a műszaki problémák száma is rávilágított arra, hogy a berendezések megbízhatósága romlik és elérte azt a szintet, amely már – a termelés kieséseken keresztül – hatással van az éves villamosenergia-termelési mennyiségre. A projekt során több feladat is megfogalmazódott, mint például az öregedéskelési program felépítése. Emellett az avulásmenedzsment is fontos szerepet kapott, mivel az annak működését bemutató dokumentáció az 1-4. blokk üzemidő-hosszabbítás engedélykérelmének egy követelménye [2]. A hangsúly elsődlegesen a nukleáris biztonság szempontjából kritikus berendezésekre irányul, azonban az avulásmenedzsment program kialakítása során társaságunk ezt kiegészítette a termelésbiztonság szempontjából kritikus berendezésekkel is.

Általában az üzemek az avulás problémájára reaktív módon reagálnak, csak annak előfordulásakor vesznek tudomást arról. Minél inkább távolodunk a berendezések üzembehelyezésének időpontjától, annál fontosabbá válik, hogy előre felkészüljünk, felépítsünk egy folyamatot a berendezések elavultságának proaktív kezelésére. Ezen program felépítésével csökkenthető vagy elkerülhető a termelés kiesések száma vagy akár a berendezések kieséséből adódó vészhelyzetek előfordulása, és lehetővé válik az elavult berendezések beszerzésének, legyártásának vagy kiváltásának minél költséghatékonyabb kivitelezése.

Módszertani leírás

A szakirodalom több típusú elavultságot is megkülönböztet: technológiai, szabályozás és szttenderd, valamint tudástípusút. Mi a technológiai elavultságra fektettük a hangsúlyt a projekt során, ezért ennek módszertani hátterét vizsgáltuk [3].

Egy jól működő proaktív avulásmenedzsment program megteremtéséhez fontos a megfelelő kompetenciával bíró szakértői kör kialakítása. Ehhez feltétlenül szükséges a beszerzési mérnök, a tervezőmérnök, az ellátási láncért felelős és a karbantartási szervezet, valamint a rendszermérnök aktív közreműködése [4].

A program kidolgozása során kooperációra van szükség az ellátási lánc szervezetei és a mérnöki szervezetek között. Az előbbieket szerepe azért fontos, mivel ők az elsők, akik észlelik, ha egy berendezés elavult, gyakran ezért ők jelennek meg vezető szerepkörben egy proaktív avulásmenedzsment program felépítésénél. Szükség van azonban az utóbbi szervezetek támogatására is, hiszen a program felépítése során vannak olyan figyelembe veendő tényezők, melyeket az ellátási lánc szervezetei nem ismernek, mint például a berendezések állapota, valamint azt sem tudják megmondani, hogy milyen gyakori és mértékű az adott berendezés tervezett karbantartása [5].

A folyamat első lépéseként fontos meghatározni a program terjedelmét (hogy mely berendezéseket szükséges vizsgálni). Különböző faktorokat kell mérlegelni, amelyek közül a legfontosabbak a nukleáris biztonságot, a termelésbiztonságot és az üzemvitel megbízhatóságát befolyásoló tényezők.

Következő lépésként a terjedelemben eső berendezések adatait szükséges összegyűjteni. Ezen adatok pontatlansága vagy hiánya helytelen elavultsági státuszt, vagy akár nem várt leállásokat és termelés kieséseket is okozhat, ezért fontos a lehető legpontosabb meghatározásuk. A minimálisan szükséges adatok közé tartozik a berendezés eredeti gyártója, cikkszám, valamint a berendezés modelljére vonatkozó információk [4].

Amikor már az összes szükséges adat megtalálható a rendszerben, akkor az elavultság vizsgálata következik. Technológiailag elavultnak nevezünk egy berendezést, amennyiben az alábbiakban felsoroltak közül akár egy is teljesül [4]:

- ha az adott berendezést már nem gyártja az eredeti gyártó, vagy annak máshonnan történő beszerzése, majd minősítése bonyolult,
- ha az adott berendezés elavult, de még megtalálható készleten,
- ha a gyártó módosítja a berendezés modelljét vagy nevét,

- ha a gyártó már nem képes megfelelő, a berendezéshez szükséges minősítési dokumentumokat rendelkezésre bocsátani,
- ha a gyártó eltér a berendezés eredeti tervezési specifikációjától.

A gyártók megkeresése során – több üzem tapasztalatai szerint – fontos odafigyelni arra, hogy az úgynevezett RFI (Request For Information – ajánlatkérés) a lehető legegyszerűbb módon történjen, ezáltal a gyártó gyorsabban tud válaszolni [6].

Amennyiben egy berendezés elavult, szükséges ezt sztemerd módon jelölni az alkalmazott vállalatirányítási rendszerben. Ennek a súlyát fontos hangsúlyozni minden, a programban résztvevő személy számára. Szükséges a berendezéselavultsági státusz bizonyos időközönkénti felülvizsgálata is [6].

Sor kerülhet immár az elavult berendezések priorizálására, amely meghatározza, hogy milyen sorrendben keressünk megoldást az elavult berendezések állapotára. Ehhez számtalan faktort lehet figyelembe venni a rendelkezésre álló adatok függvényében. Három területre szükséges fókuszálni: az adott berendezés kritikussági besorolására, a tervezett beszerzési igényre, valamint a berendezés cserealkatrészeinek rendelkezésre állására [4]. Az Electric Power Research Institute további tényezőket is megemlít, melyeket érdemes figyelembe venni, ezek az alábbiak [4, 6]:

- SPV (egyszeres meghibásodási kockázat) osztályozás, a berendezés jelenlegi állapota,
- a berendezés biztonsági besorolása, szeizmikus és környezeti besorolás,
- múltbeli fogyás, karbantartások számának vizsgálata, a maximum-minimum készlet mennyisége,
- a munkautasítások prioritása, a meghibásodások súlyosságának mérlegelése,
- van-e már elérhető megoldás, amivel kiváltható az elavult berendezés,
- az üzemben használt azonos berendezések száma,
- a berendezés meghibásodási rátája,
- aktuális készletszint.

Amint megtörtént a már elavult berendezések priorizálása, az optimális megoldás megkeresése következik. Megoldási lehetőség bőven akad, ezek azonban erőforrás és költség szempontjából jelentősen eltérőek lehetnek. Azt is fontos szem előtt tartani, hogy a választott megoldás hosszútávon, vagy csak rövidtávon alkalmazható.

- **A berendezés megtalálható az úgynevezett „surplus” piacon:** a berendezést az eredeti gyártó már nem gyártja, esetleg megtalálható készleten más, pl. leértékelt termékek beszerzésére, majd értékesítésére specializálódott vállalatoknál [4].
- **Speciális gyártás:** Előfordul, hogy a berendezés eredeti gyártója hajlandó egy előre meghatározott mennyiségben legyártani az adott berendezést, mely elegendő készlettel látja el az üzemet [4].
- **Felújítás / javítás:** Ez az elhasználódott vagy hibás berendezések meghatározott állapotra történő cseréjét jelenti, amennyiben a pótalkatrészek rendelkezésre állnak a piacon. A felújítás pedig a vizsgált berendezések helyreállítására vonatkozik [4].

- **Ekvivalens alternatíva használata:** Az üzemek életében ez a leggyakoribb módzat az elavultság okozta helyzet megoldására. Ezt akkor lehet választani, ha a piacon megtalálható egy olyan alternatív berendezés, melynek jellemzői megegyeznek az eredeti berendezés specifikumával [4].

- **Egyéb berendezések alkatrészeinek használata:** Ezt a megoldást a szakirodalom „kannibalizmusnak” is nevezi. Ez a javítás egyik speciális esete, ahol az adott berendezés javításához szükséges alkatrészt egy már a termelés szempontjából nem használt, de készleten lévő berendezésből szerelik ki [4, 7].

- **Fordított tervezés / visszafejtés:** Ez a „reverse engineering”, az adott, elavult berendezés és a hozzá kapcsolódó dokumentáció (műszaki rajzok, illetve specifikációk) analizálását követően képes a vállalat saját maga reprodukálni a tervet és legyártani az adott berendezést [4, 8].

- **Tervmódosítás:** Az elavult berendezés teljes rendszerét szükséges módosítani annak érdekében, hogy egy nem ekvivalens alternatívát alkalmazni lehessen [1, 7].

A költség-, és erőforrás-ráfordítás szempontjából optimális megoldás az úgynevezett „kannibalizálás”, de ez is sokszor csak átmeneti jellegű.

Mint, ahogy minden új folyamatnál, itt is szükséges a visszamérés, a folyamatos fejlődésre való törekvés és a felmerülő problémák kiküszöbölése, megoldása.

Két típus ajánlott: egyik az időszakos értékelés, a másik az úgynevezett KPI-ok (Key Performance Indicators, kulcs teljesítménymutatók) meghatározása és monitorozása. Az alábbiakban felsorolunk néhány ilyen mutatót, melyek nagymértékben támogatják az avulásmenedzsment program monitorozását [4]:

- elavult berendezések,
- azonosítatlan berendezések,
- ...és a hiányos adatokkal rendelkező berendezések százalékos aránya,
- azon, avulással kapcsolatos problémák száma (éves bontásban), melyeket nem szűrtek proaktívan, és reaktív módon történt a megoldásuk,
- az összes, már megvizsgált és még nem vizsgált berendezés száma,
- azon elsődleges prioritást élvező berendezések száma, melyek elavult státuszt kaptak, és még nem történt meg a feldolgozásuk,
- a még fel nem dolgozott, elsődleges prioritást élvező elavult berendezések esetén a feldolgozásra várakozás ideje,
- elavultság okozta, elhalasztott vagy törölt karbantartások száma,
- elavultság okozta helyzet megoldásának átlagos átfutási ideje,
- avulásmenedzsmenttel kapcsolatos sürgősségi felárak mértéke,
- az elavulás következtében felmerült teljesítménycsökkenések száma.

Azon kívül, hogy folyamatosan azonosítjuk az elavult berendezéseket, ajánlott egy olyan rendszer megtervezése és fejlesztése, amely - meghatározott mutatók segítségével -

felismeri a közeljövőben elavulttá váló berendezéseket. Az elavultság tipikus jelzői az adott berendezés költségének vagy a beszerzés átfutási idejének jelentős mértékű növekedése, hiszen ezen indikátorok azt mutatják, hogy a berendezés legyártása egyre nehezebb. Érdemes a költség és az átfutási idő növekedésének okait már a beszerzés során kideríteni, hogy az avulási program vezetője mielőbb értesülhessen a lehetséges veszélyről [4, 6].

Avulásmenedzsment program a Paksi Atomerőműben

A program kidolgozásához elsőként kutatómunkát végeztünk, majd felmértük a műszaki és logisztikai IT rendszereinket, ellenőriztük, hogy a műszaki vállalatirányítási rendszerünk (Asset Suite, AS9) milyen módon képes kezelni az avulásmenedzsment problémakört, valamint megvizsgáltuk, hogy milyen adatok állnak rendelkezésünkre.

Egyrészt a szabályozási környezetet kellett kialakítani, másrészt megoldást találni a logisztikai módszertanra, értve ez alatt a vizsgálandó terjedelem meghatározását, valamint a kockázat értékelési szempontrendszer elemeit, továbbá megteremteni annak lehetőségét is, hogy kialakítsunk egy olyan informatikai hátteret, mely a tevékenységben résztvevők munkáját támogatja.

A folyamat első részében a vizsgálandó berendezések terjedelmét határoztuk meg, mely két csoportból tevődik össze:

- nukleáris biztonság szempontjából kritikus berendezések;
- termelésbiztonság szempontjából kritikus berendezések.

Mivel az összes berendezés vizsgálata rendkívül idő- és erőforrásigényes lenne, ezért a projektmunka kezdetén szűrőrendszert alakítottunk ki. A nukleáris biztonság szempontjából kritikus berendezéseket automatikusan bevontuk a vizsgálandó terjedelembé (ezen terjedelembé tartoznak az AS9 vészhelyzeti készletek), a termelésbiztonság szempontjából kritikus berendezések szűrésekor pedig az alábbi kritériumokat vettük figyelembe:

- utolsó beérkezés dátuma (2001 előtti, 2012 előtti, 2020 előtti, 2020 utáni);
- származási ország (szankcióval sújtott, EU-n kívüli, EU-s, magyarországi);
- ellátási idő (0-3 hónap, 3-6 hónap, 6-12 hónap, 12+ hónap);
- berendezés kritikussági besorolása¹ (kritikus, jelentős 1, jelentős 2, hibáig üzemel, nem releváns).

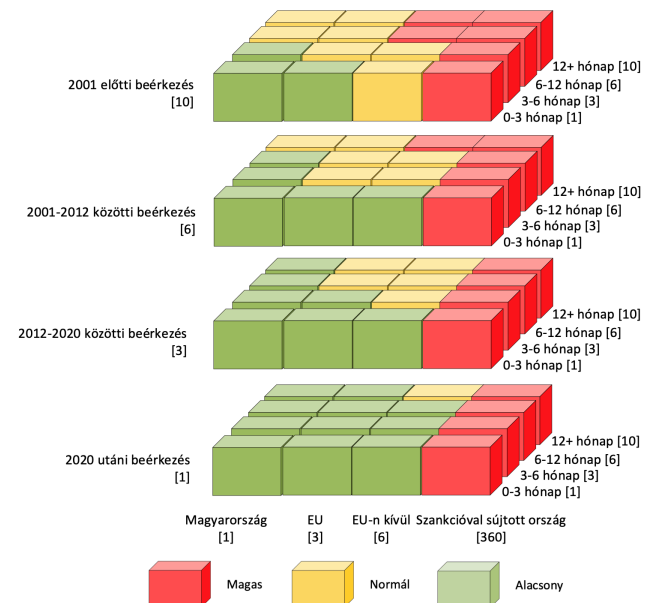
A fenti kritériumokat kétlépcsős rendszerben vizsgáltuk, ennek érdekében két kockázati mátrixot hoztunk létre. Az első kockázati mátrixban az utánpótlás kockázatának mértékét (alacsony, normál, magas) határoztuk meg, majd az ebből adódó eredményt beépítettük a második mátrixba. Ez utóbbi eredménye azt hivatott meghatározni, hogy az adott berendezés bekerüljön-e a vizsgálandó terjedelembé, vagy sem.

Az utánpótlás kockázata mértékének meghatározásához a fenti felsorolás három kritériumát (utolsó beérkezés dátuma, származási ország, ellátási idő) vettük figyelembe, ahol a kategóriákon belül elért eredmény alapján különböző kockázati értékeket (lásd 1. ábra) rendeltünk a berendezésekhez. Ezen értékek összeszorozásával kaptuk meg eredményül az első RPN (Risk Priority Number – kockázati prioritási szám) értékünket, melyet három

(alacsony, közepes és magas kockázatú) csoportba osztottunk. Ezen felül kimondtuk azt is, hogy azon berendezések, melyek esetén szankcióval sújtott országban van a gyártó székhelye, minden esetben beleessenek a terjedelembé.

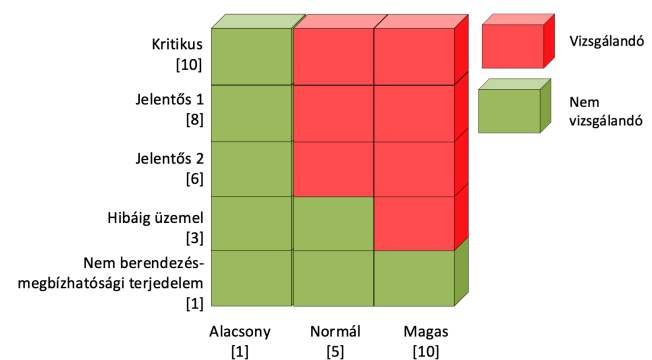
A kockázati értékek meghatározásánál nem lineárisan, hanem exponenciálisan növekvő értéket rendeltünk az elemekhez, ezáltal a kockázatosabb kategóriákba eső berendezések halmozottabb kockázati értéket kapnak.

A 1. ábra bemutatja, hogy az egyes kategóriaegyüttesek az utánpótlás szempontjából milyen kockázati mértéket (alacsony, normál, magas) kaptak, illetve ugyanitt az egyes kategóriákhoz rendelt kockázati értékeket is megjelöltük.



1. ábra: Utánpótláskockázati mátrix

Az utánpótláskockázat mértékének meghatározását követően egy újabb RPN szám kalkulálása történik, amely alapján már eldönthető, hogy mely berendezés essen bele a vizsgálandó kategóriába. Ezt szemlélteti az 2. ábra.



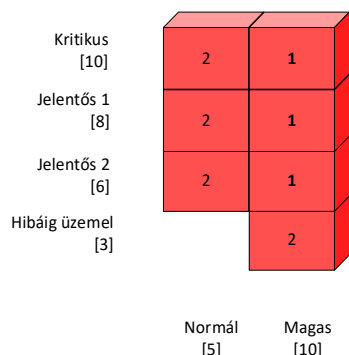
2. ábra: 2. Kockázati mátrix

A kockázati mátrix alapján az avulás szempontjából vizsgálandó berendezések terjedelmét a műszaki szervezetek felülvizsgálják, és indokolt esetben a rendszerben nem megtalálható adatok felhasználásával kiegészíthetik, valamint szűkíthetik a vizsgálandó tételeket. Ezt követően a beszerzési szervezet piackutatást végez, mely alapján megállapítható az egyes berendezések elavultsága. Amennyiben egy berendezés kapcsán megállapítást nyert, hogy elavult, és ezt a státuszt

¹A felsorolásban található kritikussági besorolást a Társaságunk a berendezés megbízhatóság alapján készítette.

rögzítettük a vállalatirányítási rendszerben, akkor a következő lépés a megoldás keresése. Ezt a tevékenységet elsősorban a műszaki szervezetek végzik, azonban néhány megoldástípusnál a beszerzési szervezet közreműködésére is szükség van.

A vizsgálandó terjedelmen belül prioritizálási rendszert is felépítettünk, ezt mutatja be a 3. ábra.



3. ábra: Vizsgálandó terjedelem prioritizálása

Látható, hogy azokkal a vizsgált berendezésekkel szükséges először foglalkozni, amelyek magas utánpótlási kockázattal rendelkeznek, valamint kritikus vagy jelentős kategóriákba tartoznak.

Amennyiben megtaláltuk az optimális, hosszú távon is alkalmazható megoldási lehetőséget, a folyamat ezen része lezárul, azonban időszakosan újra el kell végezni ezt a vizsgálatot. Az újonnan végzett terjedelemvizsgálatba természetesen azon elemek nem kerülnek bele, amelyek már a korábbi vizsgálat alapján megkapták az elavult státuszt, vagy még nem zárult le a korábbiakban indított piackutatásuk, ez az időszakos felülvizsgálat a még nem elavult/nem vizsgált berendezések vizsgálatára szolgál.

A programot még további két folyamattal szükséges kiegészíteni: az egyik a monitorozáshoz használandó KPI mutatók meghatározása, a másik az egyéb önmérési módszerek fejlesztése, valamint megfelelő mutatók meghatározása.

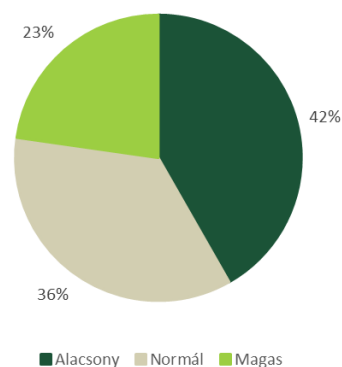
A prioritizálási rendszerünk ellenőrzésére elkészítettük az avulásmenedzsment programunk első elemzését a kockázati mátrixok alapján. A kockázati mátrixban található adatokat a vállalatirányítási rendszereinkből tudtuk kinyerni, azonban sok esetben előfordult, hogy az adatok pontatlanok voltak vagy hiányoztak. Ilyenkor automatikusan közepes kockázati értéket rendeltünk az egyes berendezésekhez. Mivel 2001-ben vezették be társaságunknál az SAP vállalatirányítási rendszert, így az ennél korábbi beszerzésekről és a szállítókról nem áll rendelkezésünkre adat.

Összesen 6636 db cikket vizsgáltunk a próbalefutás során, amelyből 3380 db esetén állt rendelkezésre a beérkezési dátum, ami mindössze a vizsgált termékek 51%-a.

A 4. ábrán látható, hogy a vizsgált berendezések 42%-ának alacsony az utánpótlási kockázata, és 23%-ának magas.

Ezt követően a berendezés kritikussági besorolása és az utánpótlás kockázata alapján határoztuk meg, hogy a berendezés vizsgálandó-e vagy sem. A 6636 cikkből 3792 db került a vizsgálandó terjedelembé, ami a terjedelem 57%-a.

Utánpótlás kockázatának eloszlása



4. ábra: Utánpótlás kockázatának eloszlása

Az első kockázati mátrix eredménye alapján elindítottuk az avulásmenedzsment folyamat első lefutását is. Elsőként az 1. prioritást kapott termékeket vizsgálták a kategóriamenedzserek, valamint azon 2. prioritást kapott termékeket is, amelyek gyártója megtalálható az 1. prioritásként kezelendő berendezések között.

Az avulásmenedzsment tevékenység végrehajtásához a kockázati mátrixokon és a piackutatási módszereken kívül további eszközünk az általunk kialakított, Avulásmenedzsment c. SharePoint (SP) felület lett az adatok megjelenítése és nyilvántartása céljából biztosítva a tevékenység minden résztvevője számára az átláthatóságot, a kommunikációs csatornát, az együttműködést és az adatok elérhetőségét. Erre a felületre feltöltöttük, - mintegy nulla állapotként - a rendelkezésünkre álló adatok és az első számítások (kockázati mátrixok és prioritizálás) szerint vizsgálandó terjedelmet, melyet a kategóriamenedzserek elemeztek és lehetőségeik szerint indították a piackutatásokat, illetve ahol rendelkezésükre állt, a piackutatási eredményadatokat is rögzítették.

Dolgozunk egy olyan informatikai megoldáson is, melynek segítségével az AS9 rendszerben egyértelműen jelölni tudjuk a beszerzés szempontjából elavult berendezéseket. Ennek érdekében több körben folytattunk koncepcionális egyeztetéseket az informatikai szolgáltató társaságunkkal, majd megtörtént a szükséges információk átadása. Az alapvető megoldást egy Avulásmenedzsment - AS Workflow jelentheti, ami a tevékenységben résztvevő szerepkörök feladatvégrehajtását tudja elősegíteni, és a továbbiakban az elemzéseket is támogatná.

Ezt az új tevékenységet validálni és helyi szinten szabályozni kellett. Elsődleges terveink között az szerepelt, hogy az avulásmenedzsment tevékenységet a Paksi Atomerőmű folyamatirányítási és szabályozási rendszerébe építve egy új, önálló logisztikai folyamatként hívjuk életre. Ehhez megalkottuk a folyamat főbb mérföldköveit is.

Miután a lehető legkörülményesebb módon körbejártuk az egy új folyamat létrehozásához, illetve élesítéséhez szükséges teendőket és az engedélyeztetési procedúrát, döntési ponthoz érkeztünk. Új folyamat kiadása - az átalakítás szabályai szerint - több hónapos és nagymértékű adminisztrációval járó engedélyeztetési procedúra után lehetséges. Végül egy másfajta struktúrában gondolkodva alakítottuk ki a tevékenység lépéseit, hogy mielőbb szabályozott keretek között tudjuk az avulásmenedzsment-tevékenységet. Az avulásmenedzsment-tevékenység tehát egyelőre nem önálló folyamatként lépett életbe, hanem a

Beszerezés és a Készletgazdálkodás c. logisztikai folyamatokba építve. Az ezekhez kapcsolódó szabályozó dokumentumokba tettük bele a leíró részt és a piackutatási feladatokat, továbbá új monitoring feladatként vettük fel a kapcsolódó kockázatértékelési módszertant. Szerepköri érintettség tekintetében elmondható, hogy logisztikai oldalról a készletelemző és a kategóriamenedzser, a műszaki oldalról a berendezésfelelős szervezet vezetője és a berendezésfelelős vesz részt a folyamatban.

Az avulásmenedzsment-tevékenységhez kapcsolódó kommunikáció és együttműködés megvalósítása a Paksi Atomerőműben

A Paksi Atomerőmű folyamatos nukleáris energiatermeléséhez szükséges berendezések ellátásának biztosítása érdekében módszertani keretrendszer alakítottunk ki az elavult berendezések azonosítása, az avulásmenedzsment tevékenység támogatása céljából.

Bár az avulásmenedzsment-tevékenységet felölelő program alapjainak kidolgozását és a kapcsolódó projekt vezetését a Logisztikai Főosztály vállalta, a munkába az illetékes műszaki és karbantartási szakmai szervezetek, valamint a Termelési Alrendszer Működés Fejlesztés Kiemelt Projekt és a További Üzemidő Hosszabbítás Kiemelt Projekt vezetőit is bevontuk.

Mind a vizsgálándó terjedelem, a kockázatértékelési módszertan, a szabályozási környezet, mind az informatikai felület kialakítása során jó együttműködést tudtunk megvalósítani a műszaki és karbantartási szakmai és a logisztikai szakterületek, illetve a két kapcsolódó projekt között.

A téma szélesebb körben való egyeztetése érdekében időközben felvettük a kapcsolatot az EPRI és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség munkatársaival is, akik elismerően nyilatkoztak tevékenységünkről. A Paksi Atomerőmű avulásmenedzsment-tevékenységével kapcsolatban előadást tartottunk a 2024. évi Nemzetközi Karbantartási, majd és a CEERM (Central European Equipment Reliability Meeting) konferencián. Az avulásmenedzsment-program részeként kiemelt hangsúlyt fektettünk – a logisztikai szakmai megfelelés biztosításán felül – arra is, hogy a velünk együttműködő szervezetek vezetőit, érintett munkatársait folyamatosan tájékoztassuk az előrehaladásról, és kifejezzük irányukba az eredeti célban megfogalmazott támogató szándékunkat. Együttműködésünk a Paksi Atomerőmű további hosszútávú működése szempontjából az idő előrehaladtával is fontos lesz.

A kommunikáció, az együttműködés és a tájékoztatás megvalósításához online csatornát használtunk, de számos esetben tartottunk személyes megbeszéléseket a programban résztvevő munkatársainkkal, melyekhez az érintett vezetők közötti egyeztetések is társultak, továbbá írásos összefoglaló tájékoztatást is nyújtottunk az avulásmenedzsment-tevékenység kialakításáról, annak a Paksi Atomerőműben betöltött szerepéről, az alkalmazott munkamódszerekről, szerep- és felelősségi körökről, az egyes tevékenységek lépéseiről, valamint az SP használatának lehetőségéről.

Összefoglalás

Társaságunknál az avulásmenedzsment-program kialakítását kutatómunka előzte meg támogatva a projekt lebonyolítását. Elsőként meghatároztuk a projekt mérföldköveit, majd kidolgoztuk a Paksi Atomerőmű avulásmenedzsment-folyamatát, és kialakítottuk a vizsgálándó terjedelem kockázatértékelési módszertanát. Meghatároztuk a tevékenységben résztvevők körét a szerep- és felelősségi körök összerendelésével. Véglegesítettük, majd hatályba léptettük az avulásmenedzsment-tevékenységet meghatározó logisztikai szabályozó dokumentumokat. Elkészítettük az első listát a berendezések vizsgálati terjedelmével, amelyet átadtunk az illetékes műszaki szervezeteknek, majd a kategóriamenedzsmenteknek a folyamat további lépéseinek megtétele céljából. Az első státuszadatokról tájékoztattuk az avulásmenedzsment-tevékenységben érintett vezetőket. A műszaki és karbantartási szervezetek illetékes munkatársait folyamatosan tájékoztattuk az előrehaladásról és az elért eredményekről.

A jövőt illetően további feladatokat is meghatároztunk, hiszen számos kihívás vár még ránk:

- az avulásmenedzsment-program működőképességének és hatékonyságának monitorozásához szükséges rendszer kidolgozása;
- KPI-k meghatározása;
- egy olyan informatikai megoldás kidolgozása, melynek segítségével automatizálni tudjuk az adatok lekérdezését, felületet biztosíthatunk a feladatok nyomon követésére, valamint az AS9 rendszerben egyértelműen jelölni tudjuk a beszerzés szempontjából elavult berendezéseket.

Úgy gondoljuk, hogy a már elért eredményekkel, illetve a megvalósítandó célok révén – jelentős mértékben tudjuk támogatni a Paksi Atomerőmű jelenleg egyik legfontosabb tevékenységét, a további üzemidő hosszabbítást és ezzel egyidejűleg az üzemelési hatékonyság növelését.

Irodalomjegyzék

- [1] *Plant Support Engineering: Obsolescence Management – A Proactive Approach*, Electric Power Research Institute, EPRI, Palo Alto 2007.
- [2] *A Paksi Atomerőmű további üzemidő hosszabbításáról*, Paksi Atomerőmű Zrt., Paks, 2023.
- [3] *Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2018.
- [4] *GNSSN, Technological Obsolescence programme*, 2021.
- [5] *Plant Support Engineering: Obsolescence Management: Program Ownership and Development*, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto 2008.
- [6] *Plant Support Engineering: Proactive Obsolescence Management: Program Implementation and Lessons Learned*, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, 2009.
- [7] Tannenbaum, M., *Technical Procurement Overview*, 2017.
- [8] Francesco Buonamici, M. C., *Reverse engineering modeling methods and tools: a survey*, Computer-Aided Design and Applications, Taylor & Francis Group, 2017.
- [9] Dr. Gyöngyösi Petra, B. S. *Avulásmenedzsment eljárásrend-tervezet*, MVM Paksi Atomerőmű Zrt., Paks, 2024.
- [10] *Obsolescence Management and Reverse Engineering*, Electric Power Research Institute, February 22-23, 2022.
- [11] GLO001_ELJ_V67 Beszerzés (Hatályos: 2024.07.08-tól)
- [12] GLO001_VU03_V52 Beszerzések végrehajtása (Hatályos: 2024.07.08-tól)
- [13] GLO005_ELJ_V28 Készletgazdálkodás (Hatályos: 2024.07.08-tól)
- [14] GLO005_VU03_V20 Logisztikai monitoring tevékenység (Hatályos: 2024.07.08-tól)

Kriogén extrúzió: kulcstechnológia a fúziós berendezések folyamatos üzemanyag-utánpótlásában

Longauer Bence

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

BME Gépészmérnöki kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

Hidrogénizotópok (prócium, deutérium, trícium) kriogén extrúziója kulcsszerepet játszik a mágneses összetartású fúziós berendezések folyamatos üzemanyag-utánpótlásában. Az elérhető üzemanyag-utánpótlási megoldások közül a pelletbelövés hatásfoka a legmagasabb, köszönhetően a nagy behatolási mélységnek. A pelletbelövő berendezések egyik legfontosabb részegysége a kriogén extruder. Ez a cikk az extruderek fejlődését kívánja bemutatni, a korai egyfűtős rendszerektől egészen a fejlett ikercsigás kialakításokig, kiemelve a működési alapelveket, a hőfejlődés okozta nehézségeket és a hidrogénizotópok komplex reológiáját kriogén hőmérsékleten.

Bevezetés

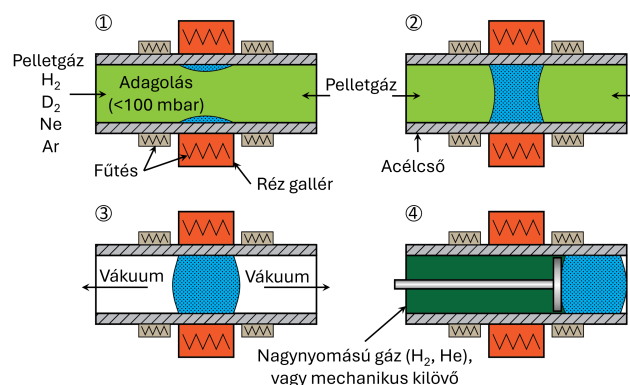
A mágneses összetartású fúziós berendezésekben – tokamakokban és sztellarátorokban – néhány tízmillió fokok hőmérsékletű plazma található, melyben hidrogénizotópok, pl. deutérium (D-D) vagy deutérium és trícium (D-T) egyesülnek energiaszabadulás mellett. A felszabadult energia egy hélium atommag és egy neutron formájában távozik. A kifelé irányuló részecsketranszport-folyamatok és a fúziós reakciók miatt az állandó plazmasűrűség fenntartásához a hidrogénizotópok utánpótlását folyamatosan biztosítani kell. Erre több lehetőség is van, pl. gázbelövés [1], szuperszonikus molekuláris nyalábinjektálás (SMBI) [2], és pelletbelövés [3].

A gázbelövés relatíve egyszerű eljárás, azonban az alacsony belövési sebesség miatt behatolási mélysége kicsi, így az üzemanyag-utánpótlás hatásfoka alacsony. Az SMBI rendszerekkel gyorsított atomokat akár több mint 1000 m/s sebességgel lövik be a plazmába [2], így a szeparátrixon átjutva néhány centiméter mélységig hatolnak be. Így az üzemanyag-utánpótlás hatásfoka jelentősen meghaladja a gázbelövessel elérhető értéket [4]. A pelletbelövés a legbonyolultabb technológia a felsoroltak közül. A fagyasztott hidrogénizotópokat apró pelletek formájában lövik a plazmába, megnövelve a behatolási mélységet. A Leidenfrost-effektusnak köszönhetően pelletek így akár több tíz centiméter mélységig is bejuthatnak a plazmában [5,6], így az üzemanyag-utánpótlás hatásfoka magasabb, mint az SMBI és a gázbelövés esetében. A következőkben a pelletbelövés technológiáját mutatjuk be részletesen, különös tekintettel a kriogén extruderekre.

Korai pelletinjektorok

Az első („pipe gun” típusú) pelletbelövők működése rendkívül egyszerű volt. A lefagyasztandó gázt egy vékonyfalú acélcsőben áramoltatták, miközben a csövet egy bizonyos szakaszon a gáz hármaspontja alá hűtötték. Ehhez a megfelelő szakaszokon réz blokkokat forrasztottak az

acélcső külső felületéhez. A gáz a hideg felületen deszublímál, végül a teljes átmérő befagy, egy pelletet alkotva (1. ábra). A pellet hosszát a gáznyomással, illetve a csövön elhelyezett külső fűtés segítségével lehet szabályozni. Az elkészült pelletet hajtógázzal vagy valamilyen mechanikus egységgel lehet kilőni. [7]



1. ábra: Pelletképződés folyamata egy „pipe gun” típusú injektorban

Ennek az injektortípusnak az a hátránya, hogy egyszerre csak egy pellet kilövésére képes, utána a fagyasztási folyamatot előlről kell kezdeni, így folyamatos üzemanyag-utánpótlásra nem alkalmas. Több egység egyidejű használatával korlátozott ideig azonban mégis használható erre a célra. Egy ilyen – 20-cső – berendezést fejlesztettek ki például az LHD sztellarátor üzemanyag-utánpótlására is [8].

Modern pelletinjektorok

A modern pelletinjektor-rendszerek alapvetően három fő egységből állnak: jégforrás, pelletvágó és gyorsító.

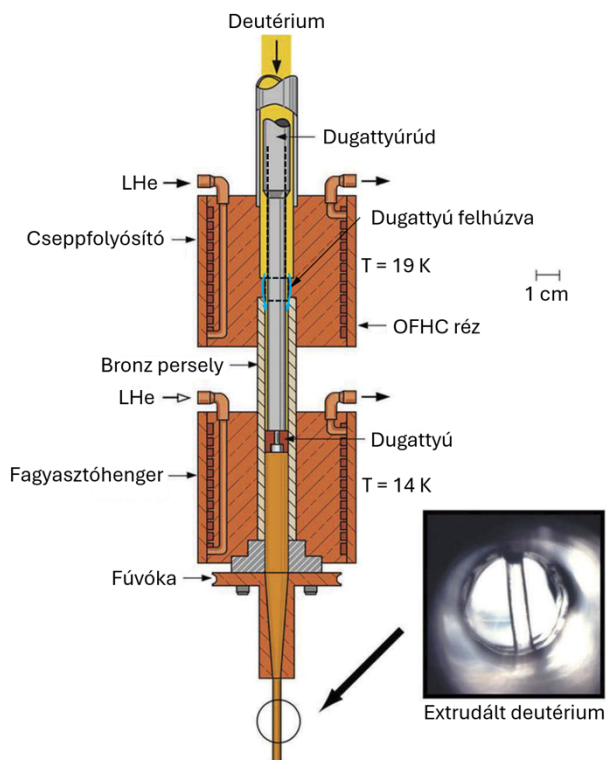
A jégforrás feladata, hogy szilárd halmazállapotú hidrogénizotópot állítson elő, rúd formájában, megfelelően szabályozott térfogatárammal. Erre a feladatra kriogén

extrudereket használnak. Az extruderből kiáramló jég rudat ezután pontos méretre kell darabolni, erre különböző pelletvágó („pellet puncher”) mechanizmusokat fejlesztettek ki. A pelleteket a vágás után néhány 100 m/s sebességre kell felgyorsítani, melyre több lehetőség is rendelkezésre áll, pl. gyorsítógáz vagy pelletcentrifuga [9]. A következő alfejezetekben a különböző extruder kialakítások kerülnek bemutatásra.

Dugattyús extruderek

A legegyszerűbb extruder típus a dugattyús extruder, ami korlátozott mennyiségű szilárd hidrogén előállítására képes. Az extruder kialakítása hasonló egy egyszerű munkahengeréhez, alapvetően egy hűtött hengerből és egy dugattyúból áll. A gázt a hűtött hengerben lefagyasztják, majd a dugattyú lenyomásával egy szűkületen keresztül kipereselik.

A gáz lefagyasztására kétféle módszer terjedt el: közvetlen deszublimáció a henger falán, vagy fagyasztás folyékony halmazállapotból. Utóbbihoz egy külön cseppfolyósító egységre is szükség van, ami pontos hőmérséklet-szabályozással folyékony halmazállapotban tartja az adott hidrogénizotópot. A 2. ábrán egy ilyen, cseppfolyósítóval ellátott dugattyús extruder ábrája látható, melyet az Oak Ridge National Laboratory-ban (Oak Ridge, TN, USA) fejlesztettek ki. A lefagyasztandó gáz felülről áramlik be a cseppfolyósító kamrába, ahol kondenzálódik. A cseppfolyósítót folyékony héliummal hűtik, valamint fűtőszálak is találhatók rajta, hogy a hőmérséklet pontosan szabályozható legyen. A dugattyú felhúzásával a folyadék lefolyik – a bronz persely kialakított hornyokon keresztül – a cseppfolyósító alatt található fagyasztóhengerbe, ahol a térfogatot teljesen kitöltve megfagy. Ezután a dugattyú lenyomásával a szilárd hidrogénizotópot az alsó fúvókán extrudálják ki.



2. ábra: ORNL dugattyús extruder [7]

A másik lehetőség a gáz direkt deszublimálásán alapul. Ebben az esetben nincs szükség cseppfolyósítóra; az előhűtött gázt közvetlenül a fagyasztóhengerbe eresztik, ahol az a palástfelületen kifagy. Mivel a hengertérfogat ez esetben nem tud teljesen befagyni, ezért az extrudálás előtt egy tömörítési lépést is be kell iktatni. A kiáramló jég útját ilyenkor elzárják pl. egy csap segítségével, majd a dugattyút lenyomják. Ekkor a jég leválik a falról és összetömörödik. A csapot ezt követően kinyitják és jeget a dugattyú lenyomásával extrudálják.

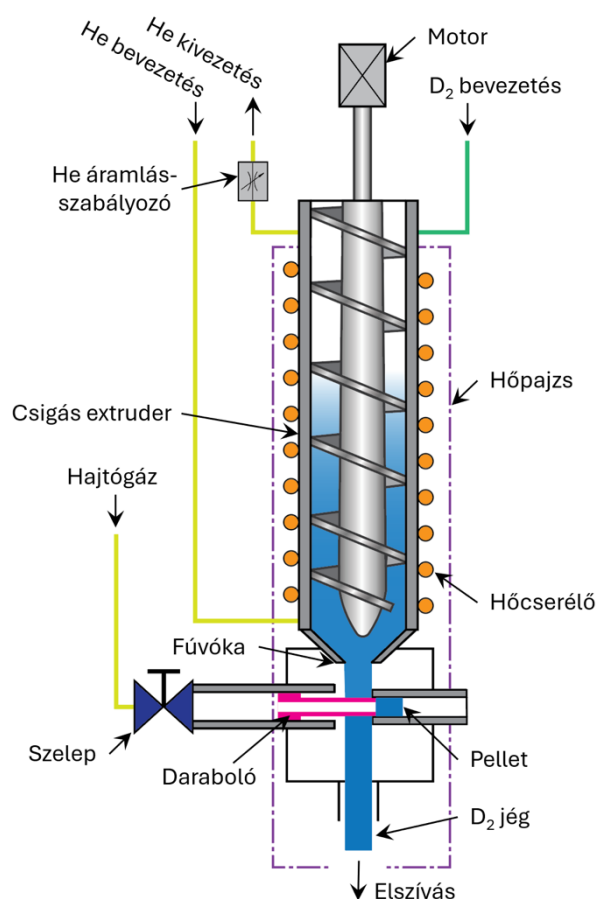
Egycsigás extruderek

A dugattyús extruderek legnagyobb hátránya, hogy csak szakaszos üzemben alkalmazhatók, viszont a legtöbb új fúziós berendezés esetében a folyamatos üzem alapkövetelmény. Erre megoldást nyújthatna, ha több dugattyús extrudert használnánk párhuzamosan, viszont megbízhatóbb és költségkímélőbb a csigás extruderek alkalmazása. Az egycsigás extrúzió jól ismert és elterjedten alkalmazott technológia a polimerek gyártástechnológiájában. Az első egycsigás kriogén extrudert az 1990-es évek végén fejlesztették ki [10].

A kriogén csigás extruderek sok hasonlóságot mutatnak a polimerek extrúziója során használatos berendezésekkel, különösen, ami a geometriát illeti. Van azonban egy jelentős eltérés: míg a polimerextrudereket fűteni kell, hogy a granulátum ömledékállapotba kerüljön, valamint az ömledék intenzív keveredését is biztosítani kell, addig a kriogén extrudereket folyamatosan hűteni kell, a használt izotóptól függően kb. 10-20 K közötti hőmérsékletre, ami jelentős tervezési kihívást jelent.

A 3. ábrán az EAST és KSTAR tokamakokra kifejlesztett egycsigás extruder sematikus ábrája látható [11]. Az extruder csiga egy réz hengerben helyezkedik el és egy vákuumátvezetőn keresztül egy villanymotor forgatja, miközben a henger külsőjét hélium gázzal hűtik egy hőcserélőn keresztül. A hélium gáz alkalmazásának legnagyobb előnye, hogy a hűtőkör így teljesen zárt, emellett pedig folyamatos üzemre is képes [12]. A deutériumot a henger tetejénél engedik be, ahol lehűl és kondenzálódik, majd megfagy. Az anyagáramot mindeközben a csiga lefelé mozgatja, a nyomás pedig a csiga mentén lefelé folyamatosan növekszik. A jég az extruder alján egy fúvókán keresztül távozik, ahol egy darabolóegység megfelelő időközönként kivág egy darabot a folytonos jég rudból, amit hajtógáz és egy szelep segítségével lőnek ki. Az extrudert és a darabolóegységet a hőveszteségek minimalizálása érdekében egy hőpajzs is borítja.

Az egycsigás extruderek hátránya, hogy az anyagtovábbítás gyakorlatilag a jég-csiga és jég-hengerfal súrlódási viszonytól függ. Ez jelentős korlát az extrudált térfogatáram tekintetében (max. ~100 mm³/s [11]). Ennek a kiküszöbölésére olyan berendezéseket kell használni, amelyek az anyagot folyamatosan mozgó, zárt, állandó térfogatokban továbbítják, függetlenül a súrlódási viszonyoktól. Az ilyen berendezéseket volumetrikus áramlástechnikai gépeknek nevezzük.



3. ábra: PELIN egycsigás extruder [11]

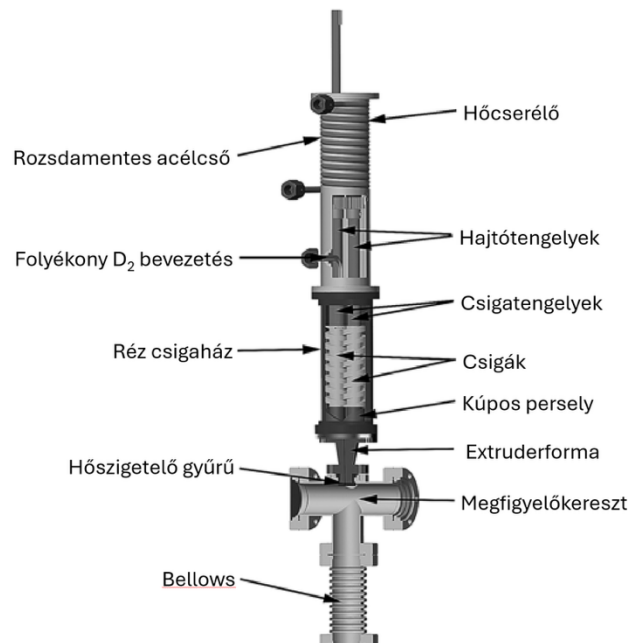
Ikercsigás extruderek

Az ikercsigás extruderek a potenciálisan magasabb, és pontosabban szabályozható térfogatáram érdekében kerültek előtérbe a legmodernebb pelletinjektorok fejlesztése során. Az ilyen típusú extrudereket széles körben alkalmazzák a polimerek feldolgozásában is, mivel az anyagáramlás a csigák közötti zárt térfogatokban (C-chamber), precízen szabályozható módon történik. Ezt a technológiát adaptálták a kriogén körülmények között működő hidrogénizotóp extruderekre is.

Az ikercsigás extruderek két, egymással ellentétes vagy megegyező irányban forgó, szorosan illeszkedő csigából állnak. A csigák geometriája biztosítja, hogy a köztük lévő anyagterefogat állandó maradjon, így a továbbított anyagmennyiség – amennyiben eltekintünk a résvesztésektől – kizárólag a forgási sebességtől és a csigák profiljától függ. Ez volumetrikus anyagszállítást eredményez, szemben az egycsigás rendszerek sűrűdésen alapuló anyagmozgatásával. Ennek köszönhetően az ikercsigás rendszerek stabilabb és nagyobb térfogatáramú extrudálást tehetnek lehetővé (max. $\sim 600 \text{ mm}^3/\text{s}$ [13]), ami különösen fontos a hosszú, folyamatos működésű fúziós berendezések esetében.

A potenciális előnyök vizsgálatára egy ikercsigás extruder prototípust fejlesztettek ki az Oak Ridge National Laboratory-ban, hogy deutériummal végzett kísérletekkel vizsgálják az ikercsigás extrudálási koncepciót. Az ikercsigás extruder (4. ábra) két darab, 27 mm átmérőjű, ellentétes forgásirányú, egymásba metsző csigából áll. A csigák egy nagy hővezetőképességű oxigénmentes (OFHC) réz házban helyezkednek

el. A csigák és a henger fala között 0,5 mm hézag található. A csigatengelyek vége bordázott, a hajtótengelyekhez bordás tengelykötéssel kapcsolódnak. A csigatengelyek alsó részét egy bronz persely támasztja meg, minimalizálva a sűrűdést és a hőfejlődést. A persely lejjebb egy 3x7 mm-es téglalap keresztmetszetre szűkül, ami egy OFHC rézből készült extruderformához csatlakozik. A réz csigaház és az extruderforma között egy indium o-gyűrű biztosítja a megfelelő tömítést. Az extruderforma tovább szűkíti a keresztmetszetet a végső 3x4 mm-es méretre. Az extruderforma és a megfigyelőkereszt között egy poliimid gyűrű is található, melynek célja a hőszigetelés. [14]



4. ábra: ORNL ikercsigás extruder [14]

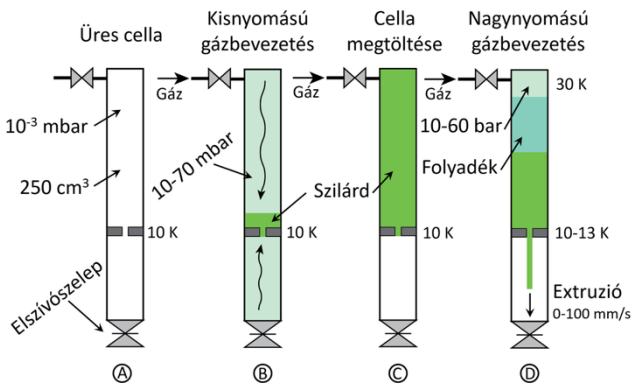
Gázdinamikus extruderek

A gázdinamikus extruderek egy új, ígéretes megoldást képviselnek, amit a CEA (Grenoble, Franciaország) fejlesztett ki a meglévő mechanikus csigás és dugattyús extruderekkel szembeni alternatívaként. A koncepció lényege, hogy az extrudáláshoz szükséges nyomást nem mozgó mechanikus elemek – például csiga vagy dugattyú – hozzák létre, hanem az előhűtött, nagy nyomású hajtógáz közvetlenül fejt ki a szükséges nyomást a szilárd hidrogéndugóra. Ez a megközelítés különösen előnyös trícium alkalmazása esetén, mivel a mozgó alkatrészek elhagyása növeli a rendszer biztonságát és csökkenti a karbantartási igényt.

A rendszer központi eleme egy kondenzációs/extrudáló cella, amelyet kezdetben 10 K hőmérsékletre hűtenek és $\sim 10^{-3}$ mbar vákuumba szívják le (5. ábra, A), majd próciummal vagy deutériummal töltik fel $\sim 10\text{--}70$ mbar nyomásra. Ezzel az extruder fúvókájában kialakul egy jégdugó, amely lezárja a cellát (5. ábra, B). Ezt követően a cella felső részében a prócium/deutérium folyamatosan deszublimalódik, miközben az alsó részből elszívják a maradék gázt (5. ábra, C). Az extrudálás indításához a cella felső részét kb. 30 K-re melegítik, miközben a hajtógáz nyomását (20–40 bar) ráengedik a jégdugóra. Ez a nyomás a fúvókán keresztül kitér a jégdugót (5. ábra, D), amely a CEA extruder esetében 2 mm átmérőjű.

A kinyomott jégrúd sebességét a fúvóka hőmérsékletének finomhangolásával lehet szabályozni: a hőmérséklet emelése az extrudálási sebesség növekedését okozza, míg a csökkentése lassítja vagy teljesen leállítja a folyamatot.

A gázdinamikus extrúzió előnye, hogy a berendezés nem tartalmaz mozgó alkatrészeket, így a tríciumkompatibilis kialakítás egyszerűbb, valamint a megbízhatóság is magasabb. Hátránya, hogy nagynyomású tríciumhálózatra van szükség az üzemeltetéshez, valamint, hogy a hőmérsékleteloszlás és a fúvóka kialakítása erősen befolyásolja az extrúziós folyamat stabilitását, továbbá, hogy a jelenlegi CEA extruder csak szakaszos működésre képes. Nagy extrudálási sebességeknél instabilitásokat is tapasztaltak a tesztelés során, melynek okai még nem tisztázottak. [15]



5. ábra: CEA gázdinamikus extruder működése [15]

Hidrogénizotópok viselkedése kriogén hőmérsékleten

A használt hidrogénizotópok csak egy igen szűk hőmérséklettartományon belül extrudálhatók, mivel szilárdságtani tulajdonságaik jelentős hőmérsékletfüggést mutatnak. Az extrudáláshoz szükséges nyomás és a nyírás során kezdődő belső hőfejlődés is széles tartományok között változik a beállított hőmérséklettől függően. Ezen paraméterek megváltozására az extrúziós folyamat rendkívül érzékeny, ezért mindenképpen ismernünk kell a szilárd hidrogénizotópok reológiai viselkedését. A szilárd prócium viselkedése például 10-13 K hőmérséklettartományon a viszkoplasztikus Bingham-modellel írható le [10]. A modell szerint a folyadék egy adott kritikus nyírófeszültség alatt szilárd anyagként viselkedik, míg afelett viszkózus folyadékként. Ez a jelenség az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}, \quad (1)$$

ahol τ a nyírófeszültség, τ_0 a kritikus nyírófeszültség, μ a dinamikai viszkozitás, $\dot{\gamma}$ pedig a nyírósebesség. A Newtoni és a Bingham folyadékmodellek összehasonlítása a 6. ábrán látható. Prócium esetében ezt a modellt annyival kell kiegészíteni, hogy a kritikus nyírófeszültség és a dinamikai viszkozitás is jelentős hőmérsékletfüggést mutat. I. V. Vinyar és A. Ya. Lukin mérései alapján [10] a hőmérsékletfüggés a következőképp írható le:

$$\tau_0(T) = 0.026 \cdot e^{0.28(T_s - T)} \text{ MPa} \quad (2)$$

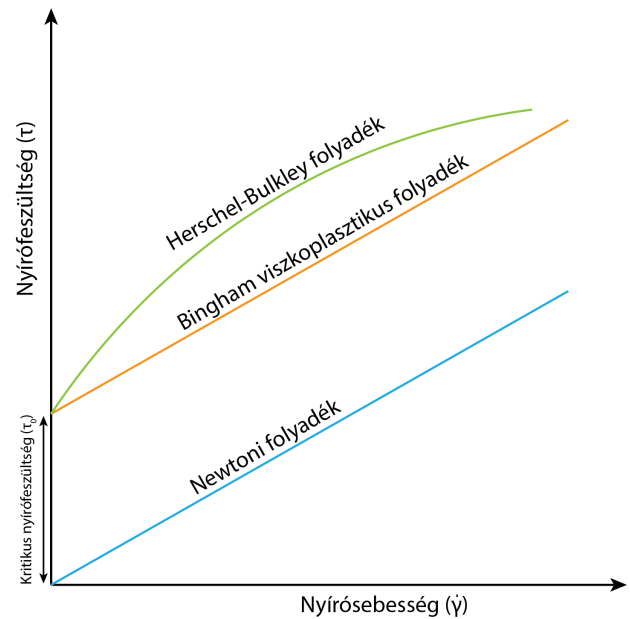
és

$$\mu(T) = 0.0027 \cdot e^{0.44(T_s - T)} \text{ MPa} \cdot \text{s}, \quad (3)$$

ahol T_s a hármasponti hőmérséklet. Újabb mérések a szilárd hidrogén az előzőektől kissé eltérő viselkedését írják le, és egy ún. Herschel-Bulkley modellt használnak a viselkedés jellemzésére [16]. A modell szerint a folyadék egy adott kritikus nyírófeszültség alatt szilárd anyagként viselkedik, míg afelett nemlineáris viselkedést mutat (6. ábra).

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

ahol τ a nyírófeszültség, τ_0 a kritikus nyírófeszültség, k a konzisztenciaindex, $\dot{\gamma}$ a nyírósebesség, n pedig az áramlásindex.



6. ábra: Anyagmodellek összehasonlítása

Hőterhelések az extrúziós folyamat során

Az alapvető hőterhelések az extruderek esetében a hősugárzás és a hővezetés (a konvekció a nagy vákuum miatt elhanyagolható). Ezek a terhelések statikus állapotban is terhelik a berendezést. A hősugárzással bevitt teljesítmény csökkentésére hőpajzsokat és Mylar fóliát használnak. Ezen kívül természetesen a sugárzó felületek nagyságának csökkentésével is minimalizálható a hőterhelés. A hővezetéssel bevitt hőteljesítmény csökkentésére kis keresztmetszeteket, megnövelt anyaghosszokat, polimer megszakításokat, és ahol szilárdsági szempontból indokolt, ausztenites korrózióálló acél elemeket használnak.

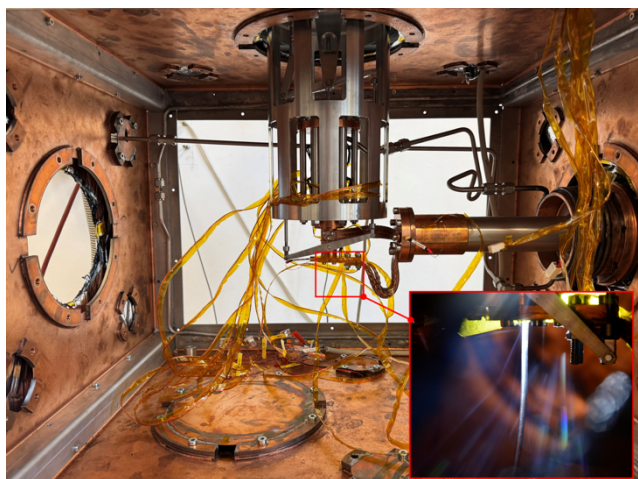
A berendezések üzemelése során egyéb hőterhelések is fellépnek. Ilyen például a gáz hűtéséből és halmazállapot-változásából származó hő. Ennél azonban sokkal jelentősebb a szilárd hidrogén nyírása során képződő hő (*viscous heat*). Ez gyakorlatilag a mechanikai energia hővé való átalakulását jelenti, melyet a nyírás okozta deformációból származó viszkózus súrlódás okoz. Ez a

folyamat megváltoztatja a szilárd hidrogén hőmérsékletét, ami hatással van annak viszkozitására és hőátadási tulajdonságaira, végső soron pedig befolyásolja az extrudálási folyamat stabilitását és hatékonyságát.

A képződő és bevezetett hő elvonására több megoldás is létezik, ahogyan azt a korábban bemutatott extruderek esetében is láthattuk. Az egyik lehetőség a kriohűtők használata. Ezek a berendezések egy zárt hélium hűtőkörfolyamat (pl. Gifford-McMahon ciklus [17]) segítségével vonják el a hőt, villamos energia befektetésével. Ezek a kriohűtők néhány watt teljesítményre képesek 4 K hőmérséklet mellett. Egy másik lehetőség a folyékony hélium használata. Ezzel a módszerrel sokkal nagyobb teljesítmény (~10-20 watt) is elérhető 4 K hőmérsékleten, hátránya azonban, hogy a cseppfolyósított hélium meglehetősen költséges, sokkal bonyolultabb infrastruktúrát igényel, körülményes a kezelése, és általában nem nyújt lehetőséget a folyamatos üzemre (dewart kell cserélni). Egy harmadik lehetőség a szuperkritikus vagy gáz halmazállapotú hélium használata. Ezek hűtőteljesítménye alacsonyabb, mint a folyékony hélium esetében, mivel ez esetben nincs halmazállapotváltozással elvont hő. Alkalmasabbak viszont folyamatos üzemeltetésre, mivel a hűtőkörfolyamat teljesen zárt, tehát csak villamos energia befektetésére van szükség.

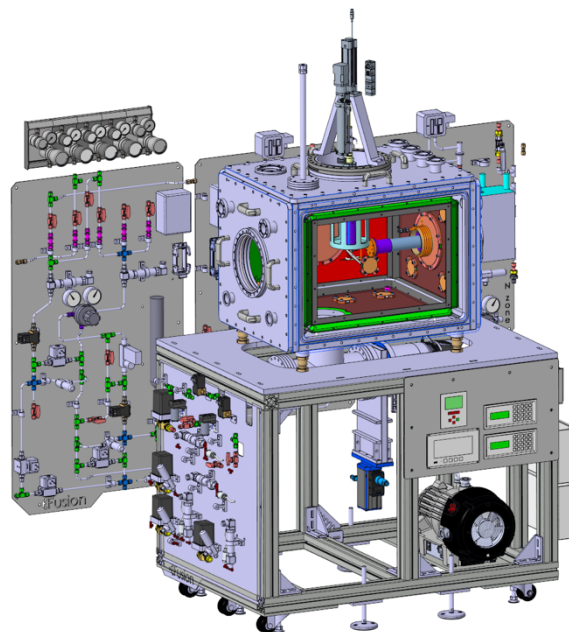
A kutatások magyar vonatkozásai

A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Fúziós Plazmafizika Laboratóriumában az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kaptak a kriogén technikákhoz kapcsolódó kutatások. Ezek részeként laboratóriumunk részt vesz a jövőbeli európai demonstrációs erőmű (EU DEMO) üzemanyagutánpótlási rendszereinek fejlesztésében, beleértve az extruder, pelletvágó és centrifugaegységeket is. A DEMO pelletvágó prototípusának teszteléséhez megbízást kaptunk egy dugattyús extruder kifejlesztésére is. A megtervezett extruder (7. ábra) elméleti kapacitása ~5000 mm³, ami a pelletvágó több mint 10 másodperces üzemeltetéséhez elegendő. Az extruder gyártása és összeállítása 2025 elején elkészült, tesztelése és továbbfejlesztése folyamatos.



7. ábra: Dugattyús extruder a Fúziós Plazmafizika Laboratóriumában

A kriogén kutatások szükségessé tették egy új infrastruktúra kifejlesztését is, mely univerzálisan többféle méréshez is használható. Ez a CryPT-ON rendszer, ami egy nagyméretű modulárisan átalakítható vákuumkamrával, hőpajzzsal, többféle hűtőrendszerrel (kriohűtő, folyékony nitrogén, folyékony hélium), valamint gázrendszerrel van felszerelve. Ez az alapinfrastruktúra kiváló környezetet biztosít az üzemanyagutánpótlással kapcsolatos mérések és tesztek elvégzésére is. A 8. ábrán a CryPT-ON rendszer CAD modellje, valamint a beépített dugattyús extruder látható.



8. ábra: CryPT-ON rendszer, összeszerelve a dugattyús extruderrel

Összefoglalás

A mágneses összetartású fúziós berendezések hosszú távú üzemeltetéséhez elengedhetetlen a folyamatos és hatékony üzemanyag-utánpótlás. A bemutatott technológiák közül a pelletbelövés bizonyult a leghatékonyabb megoldásnak, különösen a nagyobb behatolási mélység és a kedvezőbb üzemanyag-hasznosulás miatt. A hidrogénizotópok kriogén extrúziója kulcsfontosságú ebben a folyamatban. A cikk részletesen tárgyalta a dugattyús, egycsigás, iker-csigás és gázdinamikus extruderek működését, azok előnyeit és korlátait, valamint a kriogén körülmények között fellépő hőterhelések és az izotópok reológiai sajátosságainak hatását az extrudálási folyamatra. A jelenlegi extruderfejlesztések célja egy nagy térfogatú, precízen szabályozható, hosszú távon is stabil működésű berendezés létrehozása, amely kulcsfontosságú a jövő fúziós reaktorai számára. Az Energiatudományi Kutatóközpontban folyó kriogén kutatások jelentősen hozzájárulnak a folyamatos üzemanyagutánpótlási rendszerek részegységeinek fejlesztéséhez, valamint üzemi paramétereik feltérképezéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] C. Sang, Z. Wang, M. Xu, Q. Wang, D. Wang, Simulation of the gas puffing fueling on the HL-2A tokamak using SOLPS, *Fusion Engineering and Design* 136 (2018) 1041–1046. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.064>.
- [2] X. Yuan, J. Li, J. Wu, J. Li, Y. Chen, H. Zhuang, Y. Zhou, X.W. Zheng, J. Hu, Development and implementation of Supersonic Molecular Beam Injection for EAST tokamak, *Fusion Engineering and Design* 134 (2018) 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.06.018>.
- [3] I. Vinyar, J. Hu, A. Lukin, J. Li, X. Yao, C. Li, Y. Chen, P. Reznichenko, 50 Hz deuterium pellet injector for EAST tokamak, *Fusion Engineering and Design* 98–99 (2015) 1898–1901. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.11.008>.
- [4] Y.L. Zhou, Z.H. Wang, X.Q. Xu, H.D. Li, H. Feng, W.G. Sun, Comparisons between tokamak fueling of gas puffing and supersonic molecular beam injection in 2D simulations, *Physics of Plasmas* 22 (2015) 012503. <https://doi.org/10.1063/1.4905641>.
- [5] E. Belonohy, O.J.W.F. Kardaun, T. Fehér, K. Gál, S. Kálvin, G. Kocsis, K. Lackner, P.T. Lang, J. Neuhauser, the A.U. Team, A high field side pellet penetration depth scaling derived for ASDEX Upgrade, *Nucl. Fusion* 48 (2008) 065009. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/6/065009>.
- [6] L.R. Baylor, T.C. Jernigan, C.J. Lasnier, R. Maingi, M.A. Mahdavi, Fueling efficiency of pellet injection on DIII-D, *Journal of Nuclear Materials* 266–269 (1999) 457–461. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00585-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00585-6).
- [7] S.K. Combs, L.R. Baylor, Pellet-Injector Technology – Brief History and Key Developments in the Last 25 Years, *Fusion Science and Technology* 73 (2018) 493–518. <https://doi.org/10.1080/15361055.2017.1421367>.
- [8] R. Sakamoto, G. Motojima, H. Hayashi, T. Inoue, Y. Ito, H. Ogawa, S. Takami, M. Yokota, H. Yamada, Twenty barrel *in situ* pipe gun type solid hydrogen pellet injector for the Large Helical Device, *Review of Scientific Instruments* 84 (2013) 083504. <https://doi.org/10.1063/1.4816823>.
- [9] I. Vinyar, A. Géraud, H. Yamada, A. Lukin, R. Sakamoto, S. Skoblikov, A. Umov, Y. Oda, G. Gros, I. Krasilnikov, P. Reznichenko, V. Panchenko, Pellet injectors for steady state plasma fuelling, *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005) 685–689. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.206>.
- [10] I.V. Vinyar, A.Ya. Lukin, Screw extruder for solid hydrogen, *Tech. Phys.* 45 (2000) 106–111. <https://doi.org/10.1134/1.1259579>.
- [11] I. Vinyar, J. Hu, S.-H. Park, A. Lukin, X. Yao, C. Li, Y. Chen, P. Reznichenko, H.-T. Kim, Pellet injectors for EAST and KSTAR tokamaks, *Fusion Engineering and Design* 124 (2017) 779–782. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.026>.
- [12] Closed Loop Helium Cooling System, Stirling Cryogenics (n.d.). <https://stirlingcryogenics.com/products/closed-loop-helium-cooling-systems-for-science-and-industry/> (accessed September 5, 2025).
- [13] S.J. Meitner, L.R. Baylor, W.D. McGinnis, R&D Extruder Developments for the Wendelstein 7-X Continuous Pellet Fueling System, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 50 (2022) 1957–1961. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3170718>.
- [14] S.J. Meitner, L.R. Baylor, J.J. Carbajo, S.K. Combs, D.T. Fehling, C.R. Foust, M.T. McFee, J.M. McGill, D.A. Rasmussen, R.G. Sitterson, D.W. Sparks, A.L. Qualls, Development of a Twin-Screw D₂ Extruder for the ITER Pellet Injection System, *Fusion Science and Technology* 56 (2009) 52–56. <https://doi.org/10.13182/FST09-20>.
- [15] J. Manzagol, N. Luchier, F. Millet, A new pellet extrusion concept for nowadays tokamak plasma fuelling and control system, *Fusion Engineering and Design* 215 (2025) 114971. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.114971>.
- [16] P.S. Ravi Kumar, S.K. Arumugam, Non-Newtonian and non-isothermal numerical modelling of a twin screw hydrogen extruder with slip imposed boundary condition on the screw surface, *Fusion Engineering and Design* 161 (2020) 111896. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111896>.
- [17] M. Thirumaleswar, S.V. Subramanyam, Gifford-McMahon cycle – a theoretical analysis, *Cryogenics* 26 (1986) 177–188. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(86\)90217-1](https://doi.org/10.1016/0011-2275(86)90217-1).

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 kripton-gáz 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

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

mennyiség 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 válaszára, 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 sugázmérési 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-, gammasugárzás) 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.

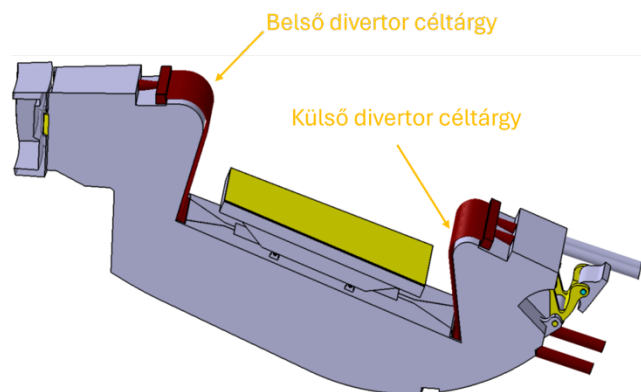
Magyar fejlesztésű Optikai diagnosztikai rendszerek a DEMO-n

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.



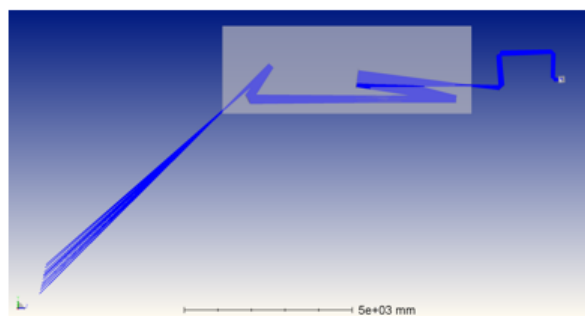
1. ábra: Divertor céltárgyak elhelyezkedése

A mérések céljai:

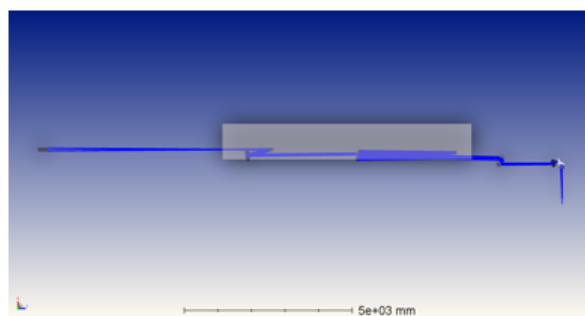
1. Plazmaleválás-ellenőrzés. Mért paraméterek: olyan spektrális vonalak, amelyek megjelenése egyértelműen jelzi a hideg plazma semleges részecskesűrűségű régiójának létezését.
2. Divertor W-erózió: belső és külső céltárgy-felület. Olyan spektrális vonalak észlelése, amelyek erős volfrámfluxusra utalnak 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

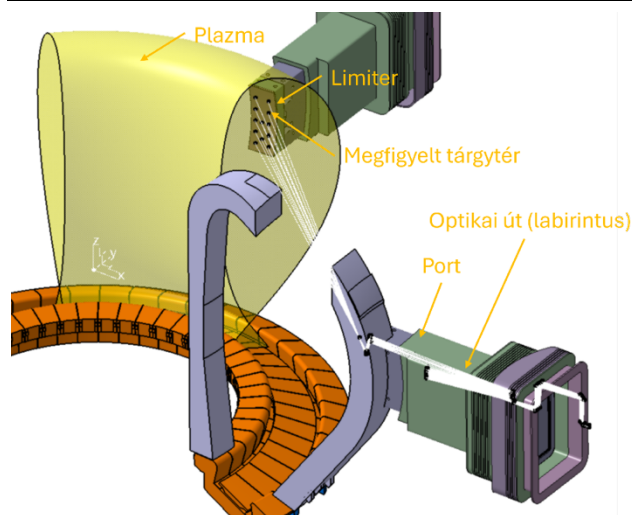
2. ábra: Belső divertor céltárgy monitoring optikai út [4]

Limiter monitoring:

A limitek 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:

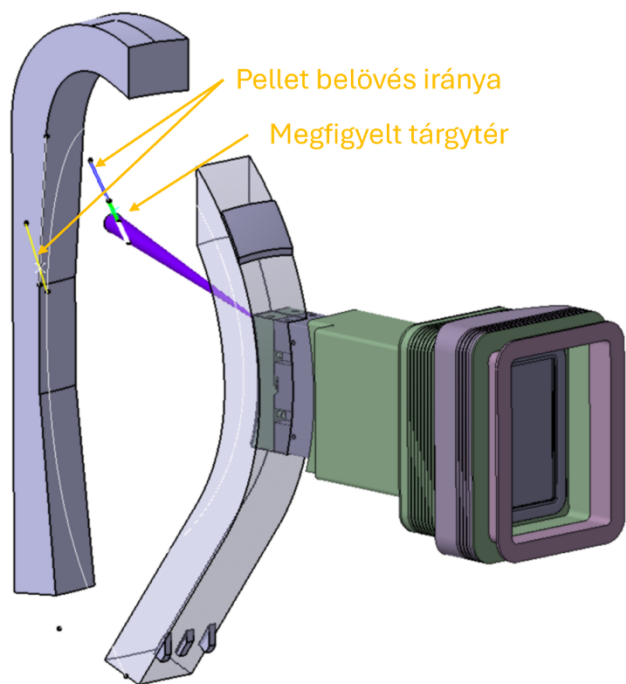
1. Valós idejű hőmérsékletmérés a plazma felfutás/leállás során
2. Valós idejű D-alfa sugárzásmérés a felfutás/leállás során
3. A diagnosztikából nyerhető további információk:
4. Valós idejű limiter hőmérséklet működés közben
5. Valós idejű D-alfa sugárzás működés közben
6. A limiter helyzetének megerősítése
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)