

FRACTESUS projekt: Fracture mechanics testing of irradiated RPV steels by means of sub-sized specimens

Besugárzott RPV acélok törésmechanikai vizsgálata kisméretű próbatestek segítségével

A FRACTESUS projekt az EURATOM 2019-2020 keretprogram NFRP-04 Innovation for Generation II and III reactors felhívásában nyert támogatást a 2020 évben. A projekt a H2020 átfogó program keretébe illeszkedik, amelynek célja a nukleáris biztonság, a védelem és a sugárvédelem folyamatos javítása, különös tekintettel az energetikai rendszer hosszú távú szén-dioxid-mentesítésének hatékony és biztonságos módon történő elősegítésére.

1. A jelenlegi európai helyzet

Az Európában működő atomerőművek többsége üzemidejének második szakaszában van, és meg kell felelnie a nukleáris biztonságról szóló irányelvben meghatározott fokozott biztonságnak. Az atomerőművek öregedéskezeléséről szóló legtöbb kézikönyvben a reaktortartály (RPV) öregedése az első helyen szerepel a biztonsági problémák listáján, mivel [1]

- az RPV az elsődleges gát a radioaktív anyagok környezetbe jutása ellen,
- a tartály tervezésből adódó meghibásodása normál és baleseti forgatókönyv esetén kizárt,
- nem helyettesíthető/cserélhető,

azonban a termikus öregedés és a sugárzás hatására a keményedés és a szívósság romlása következhet be.

Az európai nukleáris program kezdetétől fogva felismerték az RPV-k degradációját. Ezért felügyeleti programokat vezettek be a ridegedés nyomon követésére. Ehhez jellemzően reprezentatív anyagokból készült, Charpy-méretű (10x10x55 mm³) próbatesteket használtak, amelyeket reprezentatív körülmények között, felügyeleti kapszulákban kellett besugározni. Bár a Charpy-mintával nem lehet közvetlenül mérni a törési szívósságot, eredetileg ezt a mintát választották a gyakorlati helykorlátok és a törésmechanikai szakértelem miatt az 1960-as években. Ezek a felügyeleti kapszulák mára gyakorlatilag kimerültek, sok reaktorban nem áll rendelkezésre több felügyeleti anyag a reaktorba töltve, nincs elegendő archív anyag a felügyeleti programok meghosszabbításához, és így nincs lehetőség a hosszú távú működés előrejelzésére.

A továbbfejlesztett kiértékelési és roncsolásmentes technikáknak köszönhetően azonosították a helyi anyagheterogenitást és a kisebb hibákat a nagyméretű kovácsdarabokban, például a reaktorfedélben, a reaktortartályban, a gőzfejlesztőben vagy a nyomáskiegyenlítőben. Ez a kérdés komoly aggodalomra ad okot az üzemeltetők és a szabályozó szervek körében, amelynek nem megfelelő kezelése a meglévő atomerőművek nagyon hosszú leállásához vagy az atomerőművek építésének komoly késedelméhez vezet [2, 3]. A helyi anyagtulajdonságok kérdésének megoldásához elengedhetetlen az elfogadott kis méretű minták használata [4, 5].

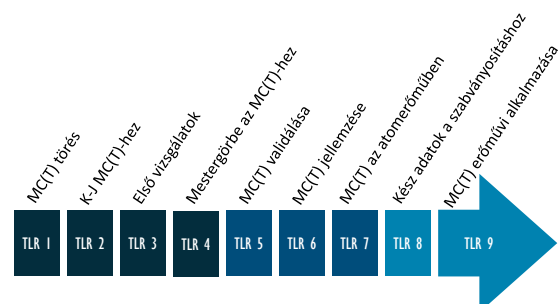
2. A projekt célja

E kérdések és aggályok megválaszolására a projekt egy innovatív megközelítést javasol, amely kisméretű próbatesteket használ a törési szívósság közvetlen mérésére. A referencia kisméretű próbatest a miniatűr CT (compact tensile) (MCT) próbatest (10x10x4 mm³), amely lehetővé teszi, hogy egyetlen törött Charpy próbatestből akár nyolc próbatestet is kimunkáljanak. Ez a megközelítés a biztonsági szint drasztikus növelését célozza:

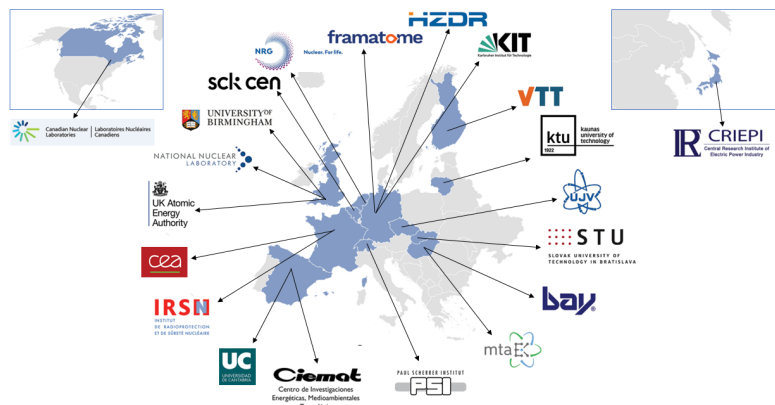
- a törési szívósság közvetlen értékelése a Charpy-méréseken alapuló félig empirikus megközelítés helyett;
- drámaian megnöveli a felügyeleti adatbázist, lehetővé téve az adatok nagyobb megbízhatóságát;
- a helyi anyagtulajdonságok jellemzése anyaginhomogenitások esetén.

Ez az innovatív megközelítés a szén-dioxid-mentésnek, az energiaellátás biztonságának és az európai atomenergia versenyképességének növelése követelményeknek is megfelel a költséghatékony hosszú távú üzemeltetés révén. Az atomerőművek hosszú távú működése akkor válik lehetővé, ha azt kiterjesztett felügyeleti programokkal lehet támogatni.

A projekt során a törött Charpy-próbatestek anyagát az reaktortartály ridegségének vizsgálatára fogják használni miniatűr CT próbatestek segítségével. Ez a projekt a III+ generációs és a jövőbeli nukleáris rendszerek számára is előnyös lesz. A jövőbeli nukleáris rendszerek, különösen a IV. generációs és a fúziós rendszerek szerkezeti anyagainak meg kell birkóznuk a nagyfokú sugárzási körülményekkel. A minősítési programok jelentős korlátot jelentenek az új anyagok és technológiák bevezetésében. Az ilyen minősítési programokat speciális besugárzó berendezésekben kell végrehajtani, és teljes mértékben reprezentatívnak kell lenniük a meghatározott működési feltételek szempontjából. Az ilyen eszközökben a besugárzási tér általában korlátozott, így a minősítési programok is nagymértékben profitálhatnak ebből a projektből.



1. ábra: A projekt technológiai készültségi szintjei [6]



2. ábra: FRACTESUS Projekt partnerek [6]

Egy projekt technológiai készültségi szintjei (Technology Readiness Levels - TRL) kilenc szint szerint osztályozhatók az 1. ábra alapján. A kisméretű minták törési szívósságának vizsgálata már elérte az 1-4. szintet, ahol a miniatűr CT (MCT) próbatetekről kimutatták, hogy a vizsgálati hőmérséklettől függően rideg és képlékeny üzemmódban törnek. A projekt lényege, hogy a technológiát a TRL5-től a validálásig, majd az iparilag releváns környezetben történő demonstrációtól a TRL7-ig, azaz a tényleges atomerőművekből származó, ténylegesen besugárzott reaktortartályon történő demonstrációig vigye. Ez a projekt a TRL8-ra való áttérés előkészítéseként a szabályozók és a kódoló testületek számára egy átfogó fájlt fog létrehozni, amely megkönnyíti a felügyeleti programok végrehajtásának módjában szükséges lépésváltást, és lehetővé teszi az MCT próbatetek használatát az atomerőművek üzemeltetői számára.

A projekt 2020 októberében indult és a 2024 szeptember 30-án zárul. A projektben számos európai intézet-labor mellett (2. ábra) részt vesz a Kanadai Nukleáris Laboratóriumok (CNL), valamint a Japán Központi Villamosenergia-ipari Kutatóintézet (CRIEPI) is.

3. A projekt módszertana

A projekt strukturálása érdekében a munkát munkacsoportokra bontják. A projekt módszertana a 3. ábrán látható munkacsoport-szerkezetet követi.

A projekt értékes eredményeinek biztosítása érdekében a tervek szerint folyamatos erőfeszítéseket kell tenni az érdekelt felek aggodalmainak kezelésére a szabályozó szervek, a szabályzat- és szabványosítási bizottságok, a végfelhasználói csoport (EUG) és a tudományos tanácsadó bizottság (SAC) rendszeres bevonásával, mely feladatot a WP1 munkacsoport látja el.

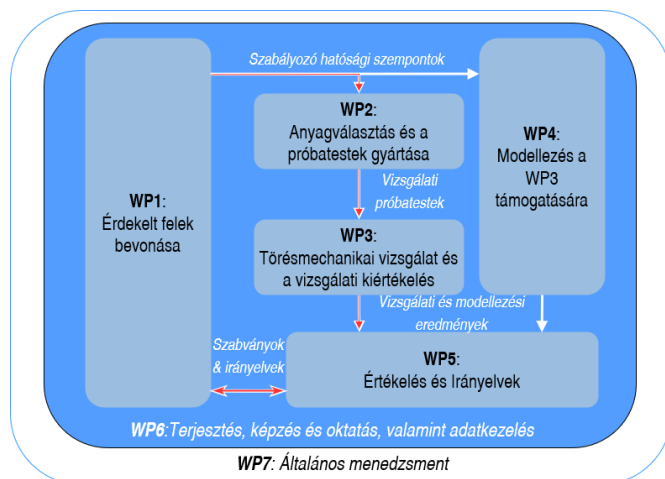
Az anyagválasztás és a vizsgálati mátrix fejlesztése során (WP2) az anyagot gondosan, a meghatározott kritériumok alapján választják ki az anyagra vonatkozó prioritások figyelembevételével (jól jellemzett, nyílt adatok állnak rendelkezésre, besugározható, elérhető).

A besugárzott anyag megmunkálását és vizsgálatát (WP2-3) a költségek megosztása, valamint az ismételhetőség és reprodukálhatóság értékelése érdekében különböző

laboratóriumok közösen végzik.

Modellezéseket (WP4) hajtanak végre az anyagvizsgálatok támogatására. A modellezés azért is olyan fontos, hogy figyelembe vegyünk és foglalkozunk a szabványok és kódok jelenlegi korlátaival a kisméretű próbatetek vonatkozásában.

A 3. ábrán a projekt kritikus útvonala piros színnel van jelölve. Az 1. munkacsoportban a SAC, az EUG, a szabványosítási bizottság, valamint a nukleáris szabályozó szervek üzemeltetőivel és a kutatószervezetekkel folytatott megbeszélések eredményeképpen az érintett felek nyitott aggályait értelmezik. Ezeket a szempontokat beépítik a 2., 3. és 4. munkacsoport tevékenységeibe. A WP2 (anyagválasztás és próbatetek gyártása) a WP3 (törésmechanikai vizsgálatok) inputjaként szükséges. A 3. és 4. munkacsoport eredményeit az 5. munkacsoport használja fel, ahol a jövőbeli tesztelésre vonatkozó iránymutatásokat határozzák meg. Ezeket az iránymutatásokat a szabványosítási bizottsággal (WP1) szoros együttműködésben optimalizálják.



3. ábra: FRACTESUS projekt felépítése [6]

4. A BZN szerepvállalása a projektben

A Bay Zoltán Közhasznú Nonprofit Kft. (BZN) két osztálya – az Anyagvizsgáló Osztály (AVO) és a Szerkezetintegritás és Gyártástechnológia Osztály (SZI) – is részt vesz a projektben. Az AVO a WP2 és WP3 munkacsoportokban működik közre, többek között az anyagválasztás, a próbatetek kimunkálása és a tervezett vizsgálatok végrehajtásában, valamint SZI-vel közösen a vizsgálatok támogatásában és kiértékelésében. Feladatuk közé tartozik a besugárzatlan anyagok vizsgálata különböző próbatetekben.

Az SZI szimulációs tevékenységekkel járul hozzá a projekthez, a vizsgálatok támogatása és kiértékelése mellett, a WP3-4 feladatrészekben. A WP4-en belül szimulációs technikát fejlesztenek ki egy körvizsgálaton belül a partnerekkel, melyet a további feladatokban alkalmazni fognak. A BZN a WP4 valamennyi feladatában részt vesz:

- WP4.1.1 „Numerikus körvizsgálat” feladatrészben a körvizsgálat alapvető feladatai mellett vizsgálja a J-integrál

- számítását szimulációs környezetben, mely összehasonlításra kerül a ASTM E1921-20 szabvány [7] számításaival.
- WP4.1.2.b „Feszültségmező számítása vizsgálati adatokkal” feladat részben, amely a vizsgálatok elvégzését követően a numerikus körvizsgálat mintájára, a szimulációk elvégzését tartalmazza.
 - WP4.1.3 „Ridegtörés” alfeladatban, amely során Beremin modell segítségével szimulálják a T_0 referencia hőmérséklet körül elvégzett vizsgálatokat.
 - WP4.1.4 „Repedésnövekedés” alfeladatban, ahol a partnerek különböző repedésterjedési modellek alapján modellezik a valós vizsgálatokat. Az SZI ebben a feladat részben Gurson-Tvergaard-Needleman modell (GTN) alapján paramétereket határoz meg mesterséges neurális hálózatok (ANN) segítségével a károsodás leírására, valamint virtuális repedézársári technika (virtual crack closure technique – VCCT) kohéziós zóna modell (cohesive zone modell – CZM) alapján is kidolgoz egy szimulációs módszert.
 - WP4.2 „Kisméretű próbatetek vizsgálati technikái” alfeladatban végelem modellt fejleszt small punch (SPT) vizsgálat-hoz, valamint keménységméréshez. E feladat részben is a GTN-féle károsodási paramétereket határoz meg ANN módszerrel, valamint érzékenységvizsgálatokat készít a vizsgálati és szimulációs hatások figyelembe vételére.

5. A projekt jelenlegi állása, eredményei

A projekt az időtartama felénél tart. Az eddigi feladatok során lezárásra került a WP1 munkacsomag, amely során összefoglalásra került a világszerte alkalmazott törési szívósság szabványok, valamint a nukleáris szabályozó szervek, az üzemeltetők és a kutatószervezetek állásfoglalásai és aggályai.

A WP2 munkacsomag hamarosan zárul; a vizsgálati mátrix elkészült. Sikeresen lezajlottak a besugárzatlan anyagok próbatest kimunkálásai, valamint 2023 első negyedévében a besugárzott próbatetek is elkészülnek.

A WP3 munkacsomag bizonyos részei már lezárultak, amely során számos besugárzatlan MCT próbatest törési szívósság (FT) vizsgálatát végezték el. Bebizonyosodott, hogy a miniatürizált próbatetek alkalmazhatóak a T_0 referencia hőmérséklet meghatározására. A besugárzott darabok vizsgálata, valamint az egyéb kiegészítő vizsgálatok (small punch, keménységmérés, fraktográfia) jelenleg is zajlik.

A WP4 munkacsomag szintén folyamatban van. Egy numerikus körvizsgálattal indult, hogy biztosítani lehessen a későbbi számítások egyértelmű összehasonlíthatóságát az adatok további, utólagos feldolgozása nélkül. E körvizsgálat során megállapították, hogy a végelem megoldók (kódok) készen állnak a további szimulációkra. A WP4 további feladatai a vizsgálatok támogatására és a szabványi számítások szimulációval történő kiegészítésére vonatkozik a 4. fejezetben részletezett alfeladatokkal.

A WP5 során számos lehetséges projektet azonosítottak a tapasztalatok és eredmények cseréje érdekében, melyek a következők: STRUMAT-LTO [8], DELISA-LTO [9] és egy német nemzeti projekt, a "Kleinproben". Ezen felül

a kísérleti eredmények a projekt végén nyílt hozzáférésűvé válnak.

A WP6 feladatai során a projektet elérhetővé tette a fő közösségi médiákban: [Twitter](#), [LinkedIn](#), [Facebook](#) és [ResearchGate](#). Ez a munkacsomag kezeli továbbá a munkafolyamatok során keletkezett projektmenedzselési, valamint képzési és oktatási tevékenységeket.

További információk a honlapon:

<https://fractesus-h2020.eu/>

Erdei Réka, Bézi Zoltán

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Köszönetnyilvánítás

A projektet az Euratom 2020-2024 közötti időszakra szóló kutatási és képzési programja támogatta a 900014. számú támogatási megállapodás (H2020 FRACTESUS) keretében. Az itt kifejtett nézetek és vélemények nem feltétlenül tükrözik az Európai Bizottság véleményét.

Acknowledgments

This project has received funding from the Euratom research and training programme 2020-2024 under grant agreement N° 900014 (H2020 FRACTESUS). The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.

Irodalomjegyzék

- [1] Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components 1st Edition V.N. Shah P.E. MacDonald (1993).
- [2] ASN press release L'ASN présente sa position sur l'anomalie de la cuve du réacteur EPR de Flamanville L'ASN présente sa position sur l'anomalie de la cuve du réacteur EPR de Flamanville.
- [3] ASN press release Anomalie de la concentration en carbone de l'acier: après contrôle, l'ASN a autorisé les réacteurs concernés à redémarrer 13/03/2017.
- [4] www.ensi.ch. Assessment of the safety case for the reactor pressure vessel of the Beznau unit 1 nuclear power plant (2018).
- [5] R. Gérard et al., Materials properties of reactor pressure vessel shells affected by hydrogen flaking, PVP2016-63901 (2016).
- [6] FRACTESUS honlap: <https://fractesus-h2020.eu/> (letöltés dátuma: 2023.12.10.)
- [7] ASTM E1921-20 szabvány: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, ASTM International, Subcommittee E08.07, 2020
- [8] STRUMAT-LTO "STRUctural MATerials research for safe Long Term Operation of LWR NPPs" H2020 Grant agreement ID: 945272, 2020-2024.
- [9] DELISA-LTO: "DEscription of the extended Lifetime and its influence on the SAFety operation and construction materials performance – Long Term Operation with no compromises in the safety" EURATOM 1.1 Grant agreement ID: 101061201