

Fusio Nuklearra Euskal Herriko Unibertsitatetik

(Nuclear fusion from the University of the Basque Country)

María Urrestizala, Jon Azkurreta, Natalia Alegría, Igor Peñalva*

Ingeniaritza Energetikoa Saila.
Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

LABURPENA: Gaur egun daukagun energia-kontsumoaren sistemak erabateko aldaketaren beharra du, faktore nabariengatik, batez ere suertatzen diren ingurumen-arazoengatik, baina baita denboran zeharreko jasangarritasunagatik ere. Hori dela eta, ezinbestekoa da alternatibak aurkitzea hainbeste erabiltzen diren erregai fosilak ordezkatzeko. Testuinguru horretan, fusio-energia nuklearra aurkezten da epe ertainera sortuko diren arazo asko konpon ditzakeen aukera teknologiko bezala. Artikuluan zehar, energia-iturri horren ezaugarri garrantzitsuenak azalduko dira; bai eta teknologiaren oinarri fisikoak ere. Horrez gain, teknologiak denboran zehar izandako garapena, gaur egungo ITER nazioarteko proiektuaren egoera eta horrek bilatzen dituen helburu nagusiak aurkeztuko dira. Azkenik, aurreko puntu guztiak kontuan hartuz, Bilboko Ingeniaritza Eskolan dagoen Fusio Materialen Laborategiaren aurkezpena egingo da, asetzen dituen beharrak azalduz haren eginkizuna ulertzeko asmoz eta instalazioen deskribapena garatuz.

HITZ GAKOAK: fusioa, ITER, energia nuklearra.

ABSTRACT: *The current energy consumption system requires a radical change due to obvious factors, especially environmental problems, but also due to sustainability over time. Therefore, it is essential to find alternatives to replace the fossil fuels that are so widely used today. In this context, nuclear fusion energy is presented as a technological option that can solve many of the problems that will arise in the medium term. Throughout the article, the most important characteristics of this energy source will be exposed, as well as the theoretical basis of this technology. In addition, the development of technology over time, the status of the current ITER international project and the main objectives it pursues will be presented. Finally, and taking into account all the previous points, a presentation of the Fusion Materials Laboratory located at the Faculty of Engineering Bilbao (EIB/BIE) will be made, explaining the goals that it satisfies in order to understand its need and developing the description of the different facilities.*

KEYWORDS: *fusion, ITER, nuclear energy.*

*** Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** María Urrestizala. Ingeniaritza Energetikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola UPV/EHU. Torres Quevedo plaza, 1 (48013 Bilbo). – urrestizala97@gmail.com – <https://orcid.org/0000-0002-7031-0739>

Nola aipatu / How to cite: Urrestizala, María; Azkurreta, Jon; Alegría, Natalia; Peñalva, Igor (2023). «Fusio Nuklearra Euskal Herriko Unibertsitatetik». *Ekaia*, 44, 2023, 335-352. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.24381>).

Jasotze-data: 2023, otsailak 6; Onartze-data: 2023, martxoak 20.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2023 UPV/EHU



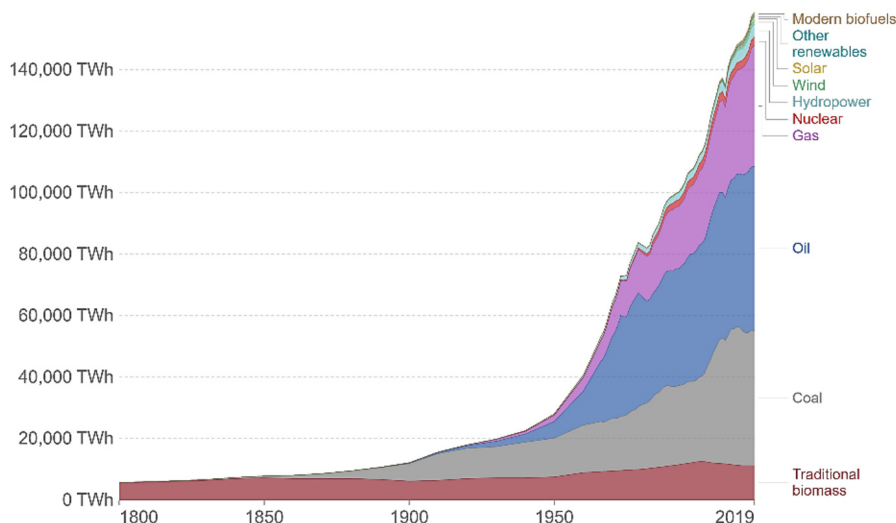
Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA. FUSIO NUKLEARRA SISTEMA ENERGETIKOAREN ALTERNATIBA MODUAN

Gaur egungo energia-sistemak erregai fosilekiko duen mendekotasuna arazo larria bihurtu da azken urteotan. Ikatzaren, petrolioaren eta gas naturalaren artean, munduko energia kontsumoaren % 80 osatzen baitute (ikusi 1. irudia), eta horrek epe ertainera kalte izugarriak sor ditzake gure planetan: berotegi-efektuaren azkartzea, euri azidoa, edota klima aldaketa, besteak beste.

Global direct primary energy consumption

Direct primary energy consumption does not take account of inefficiencies in fossil fuel production.



1. irudia. Energia kontsumoa mundu-mailan [1].

Dena den, erregai fosilen errekontzarekin zerikusia izan dezaketen ingurumen-gogotez gain, gakoa askoz ere objektiboagoa da: demografiaren eta, hortaz, energia-kontsumoaren joerak gora egiten duten bitartean, erreserba fosilak, paraleloki, geroz eta urriagoak bihurtzen ari dira. Beraz, nahiz eta zehazki ez dakigun alderdi hori noiz hasiko den benetako arazo bihurtzen, erreserbei buruzko etengabeko eguneratzeak direla eta, lehenago edo geroago, iritsiko da momentua, eta gizarteak egoera horri aurre egin beharko dio energia-iraultza baten bidez, gure kontsumo-ohiturak errotik aldatuz.

Hori dela eta, egoera konplexu horri aurre egiteko asmoz, fusio-energia nuklearraren erabilera planteatzen da, epe ertainera sortuko diren arazo

asko konpon ditzakeen aukera teknologiko alternatibo gisa, energia-iturri masiboa, agorrezina, garbia eta segurua izatea espero baita.

Fusio nuklearra Eguzkiaren eta gainerako izarren energia-iturria, da eta izatez, gaur egun ezagutzen diren fusio-erreaktore eraginkor bakarrak horiek dira. Gizartearen etorkizunerako, oso aukera erakargarria bihurtzen ari da fusio nuklearra: batetik, fusio-erreakzioak modu kontrolatuan eta energetikoki errentagarrian aurrera eramateko behar diren erregaiak ugariak eta Lurrean irisgarriak direlako; eta bestetik, prozesuak, berez, seguruak direlako eta ingurumenarekiko jasangarriak

Dena den, alde negatiboak edo baldintzatzaileak ere baditu, eta nagusia sistema-teknologikoen konplexutasunean datza, erreakzioa era jarraituan eta bideragarrian gertatu dadin. Hala ere, fusio nuklearraren bideragarritasun zientifikoa frogatu da dagoeneko, eta gaur egun bideragarritasun teknologikoa egiaztatzeko fasean aurkitzen da. Horretarako, zientzia-elkarteak modu koordinatuan, eredugarrian eta nazioartekoan lantzen ditu fusioaren ikerketari buruzko gakoak, ITER proiektuaren bidez.

Fusio nuklearrak beste ordezkoko energia-iturri batzuekiko dituen abantaila nagusiak honako puntu hauetan laburbil daitezke [2]:

- Fusioaren dentsitate energetikoa momentura arte ezagutu den altuena da; hau da, erabilitako erregai-masaren unitate bakoitzeko lor daitekeen energia-kopurua itzela da.
- Berez segurua den teknologia da, ezinezkoa baita kate-erreakzio nuklear bat kontrolik gabe gertatzea, plasman ezegonkortasunak agertzekotan, fusio-erreakzioak sortzeko gaitasuna galtzen da eta.
- Fusio-erreakzioak eragiteko behar diren elementuak, deuterioa eta litioa (tritioa lortzeko), ia agorrezinak dira, eta baldintza ekonomiko onargarrietan lor daitezke, nahiz eta, noski, kudeaketa arduratsua izan behar den.
- Fusio-erreaktore nuklearren etorkizuneko eragiketak ez du berotegi-efektuko gasik sortuko, eta, beraz, ingurumenaren aldetik energia garbitzat har daiteke.
- Fusio-erreakzio nuklearrek, fusio-erreakzio nuklearrek ez bezala, ez dute aktibitate handiko hondakin erradioaktiborik sortzen, soilik materialen aktibazio neutronikoa. Horren ondorioak kudeatzeko, materialak hobetzeko programa bereziak daude, eta, beraz, horrek ez du desabantaila handirik eragingo.

Ezaugarri horiek guztiek etorkizunean kontuan hartu beharreko ordezkoko iturri bihurtzen dute fusioa.

Bestalde, zenbait ikerketa egin dira ekonomiaren ikuspegitik fusioa energia-merkatuan sartzeko baldintzak aztertzeko, eta, era berean, sistema

energetikoan zein ingurumenean izan dezakeen garrantzia aztertu da [3]. Horien arabera, fusio nuklearrak 2050-2060 inguruan sistema energetikoan sartzeko aukerak ditu, 2100 urterako sistema elektrikoaren zati garrantzitsua bihurtuz; horri esker, CO₂ isuriak murriztea eta energiaren kostuak gutxitzea espero da. Era berean, energia-iturri berriztagarrien eta fusio nuklearraren arteko bateragarritasunari buruzko ikerketak egin dira: teknologia horiek, aldi berean existitzeaz gain, modu egokian elkar osatu ahal izango dutela baieztatu da [4].

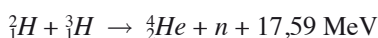
2. FUSIO NUKLEARRAREN OINARRI FISIKOAK

Fusio nuklearra erreakzio bat da, non bi nukleo arin (hidrogeno eta burdin elementuen artekoak) elkartzen diren nukleo astunago eta egonkorrago bat osatzeko, energia-askapen handia gertatuz. Bi nukleo hurbiltzen saiatzean, horiek elkarrengandik aldentzen ahaleginduko dira indar elektrostati-koak direla eta, biek karga elektriko positiboa baitute. Erreakzio hori gerta dadin, beraz, aldaratze-indar hori gainditu behar da, nukleoak erakarpen-indar nuklearrak nagusi bihurtzeko adina hurbildu daitezen (10⁻¹³ cm-ko distantziara). Hori lortzeko, energia termiko handia eman behar zaie nukleoei; horri esker horien energia zinetikoa nabarmenki handituko baita eta elkarren aurka abiadura handian talka egingo baitute. Prozesu horri fusio termonuklearra esaten zaio.

Fusio-erreakzioak eragin ahal izateko, beraz, baldintza zehatz batzuk bete behar dira:

- Elektroiak nukleotik bereizteko behar den tenperatura nahikoa lortzea eta nukleoa beste nukleoetara hurbiltzea lortzea, aldarapen elektrostatikoko indarrak gaindituz. Eguzkiak duen presioa (2.000 atm) konpentsatu ahal izateko, 10⁸ °C inguruko tenperaturak beharrezkoak dira hori lortzeko (Eguzkiaren tenperatura 10 aldiz) [5].
- Plasma baldintza horietan gutxieneko denbora batez mantentzeko beharrezko konfinamendua izatea.
- Plasma-dentsitate nahikoa lortzea fusio-erreakzioak gertatzeko.

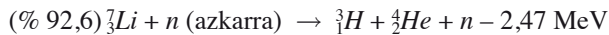
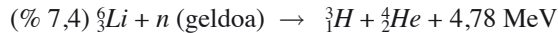
Posible diren zazpi konbinazioen artean, fusio-erreaktoreetan aurrera eramango den erreakzioa honako hau izango da, egingarriena delakoan (segurtasuna, bideragarritasun energetikoa eta ekonomikoa eta probabilitatea kontuan hartuz) [2]:



Erregaiak lortzeari dagokionez, *deuterioaren kasuan*, ${}^2_1\text{H}$, erregai naturala da eta nahiko erraz lor daiteke uretik elektrolisiaren bidez. Itsasoko

uretan duen ugaritasuna atomo batekoa da 6.500 hidrogeno atomoko [6], hau da, 32 g deuterio daude itsasoko ur metro kubiko batean; beraz, ez da inolako hornidura-arazorik izango.

Tritioaren kasuan, berriz, ${}^3\text{H}$, isotopo erradioaktiboa da, 12,3 urteko erdidesintegrazio-periodoa duena, eta Beta igorlea. Zaila da naturan aurkitzea, haren ugaritasuna % 0,00001ekoa baita, baina artifizialki ekoiztea posible da, litioa erabiliz honako bi erreakzio hauen bitartez:



Horretarako, fusio-erreaktoreak ekoizpen horri dagokionez autosufizienteak izateko diseinatu dira: erreaktoreen barruan litioa duen *bilgarri birsortzailea* deituriko elementua egongo da. Fusioaren ondoriozko neutroi oso azkarrek hainbat erreakzio eragingo dituzte ${}^7\text{Li}$ -arekin, energia galduko dute eta ${}^6\text{Li}$ -ak behin betiko xurgatuko ditu, beharrezko tritioa sortuz modu errentagarrian. Tritio hori berreskuratu eta erregai moduan berriz ere fusio-erreaktziorako erabili ahal izango da. Interesgarria da kontuan hartzea gaur egun litioa elementu ugaria dela lurrazalean eta itsasoko uretan, eta, beraz, uste izan dezakegula hornidura-arazorik ez dela izango ere bigarren kasu honetan [7].

Hala ere, kontuan hartu behar da litioaren erabilera nagusia ez dela fusioarena, baizik eta berriz kargatzeko bateria elektrikoena, eta horregatik haren ustiapena nabarmenki handitu dela azken urteotan. Hori dela eta, ezinbestekoa da kudeaketa ona egitea eta petrolioarekin edo gasarekin gertatu den bezala erabat mendeakoa ez bihurtzea. Horretarako, Europar Batzordeak proiektu estrategikoak identifikatzea proposatzen du erreserba estrategikoak eraikitzeko unean eta horniketa-kate osoan zehar: erauzketa-, fintze-, prozesatze-, eta birziklatze-prozesuetan [8].

3. ITER PROIEKTUA

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) eskala handiko proiektu zientifiko bat da, eta haren helburu nagusia fusio-energiaren bideragarritasun teknologikoa energia-iturri gisa frogatzea da. Garrantzi handiko urratsa izango da plasmaren fisikaren lehen azterketetatik etorkizuneko konfinamendu magnetikozko fusio-erreaktore komertzialetaranzko bilakaeran.

Proiektua Genevan sortu zen 1985ean, Gorbatxovek, garai hartako Sobietar Batasuneko idazkari nagusiak, Reagani, Amerikako Estatu Batue-

tako orduko presidenteari, fusioko energia nuklearra modu baketsuan erabiltzeko nazioarteko proiektu bat proposatu zionean. Hurrengo pausoetan Frantziako presidentea, Mitterrand, eta Erresuma Batuko Lehen Ministroa, Thatcher, ere elkartu ziren [8]. Proposamen horren ondorioz, urtebete geroago, Sobietar Batasunak, Amerikako Estatu Batuek, Japoniak eta Europar Batasunak (Energia Atomikoaren Europar Elkartearen bidez, EURATOM) lehen akordioa sinatu zuten. Urte batzuk pasatuta, Txinako Errepublika Popularra, Koreako Errepublika eta Indiako Errepublika ere elkartu ziren. Gaur egungo kideak Txina, Europar Batasuna, Suitza, India, Japonia, Korea, Errusia eta Estatu Batuak dira, eta kide bakoitzak etxe-agentzia bat ezarri du eta proiektuaren edozein alderditan informazio guztia partekatzea adostu dute: zientzia, eskuratzeko, finantzaketa, langileak, eta abar. Horrela, epe luzera bakoitzak bere fusio-zentrala abian jartzeko gaitasuna izatea lortu nahi da.

Diseinua 1988an hasi zen, eta etengabe garatuz joan da 2001an ITER proiektuaren erreaktorearen behin betiko diseinua onartu zen arte. Kokalekuari dagokionez, Cadarachen (Frantzia) eraikitzea adostu zen negoziazio-tarte zail baten ostean. 2007an obra zibilari ekin zioten, eta 2010an erreaktorea bera eraikitzen hasi zen. Lanak amaitzeaz daude eta 2025erako lehenengo plasma eskuratzeko espero da, 2035an deuterioarekin eta tritioarekin lan egiteko jada. 2. irudian, lanen egoera ikus daiteke.



2. irudia. Tokamak hobiaren egoera 2021ko abenduaren 20an [9].

Jarraian, ITER erreaktorea berariaz zer helburu nagusitarako diseinatu den zehazten da [9]:

- *500 MW-eko fusio-potentzia ekoiztea 400 s-ko pultsuetan.* Sortutako potentzia-errekorra 1997an lortu zuen JETak (Joint European Torus) plasma sortu ahal izateko, sistematik 16 MW berreskuratuz 24 MW sartu ondoren. Horrek $Q = 0,67$ fusio-energiaren irabazi-faktorea dakar. ITERek sisteman sartutakoa adina energia ateratzeak dakarren atalasea gainditu nahi du ($Q = 1$) konfinamendu mota honekin eta irabazi-faktore askoz altuagoa lortu, $Q = 10$, fusio-prozesuaren bideragarritasun energetikoa frogatzeko. Horretarako, 50 MW sartzea eta 500 MW ateratzea aurreikusten da 400 s/ 600 s-ko pultsu luzee-tan. Baina ITERek, oraingoz, ez du erabiliko potentzia hori elektrizitatea sortzeko.
Kontuan hartu beharra dago $Q = 1$ atalasea jada gainditu dela 2022an LNLLren esku (AEB) inertzia-konfinamenduaren bidetik, 3,5 MJ sortuz 2,05 MJ sartu ondoren. Energia ekoizpen txiki-txikia suposatu zuen, baina fusiorako helburu garrantzitsu baten lorpena [10].
- *Fusio-erreaktore batean beharrezkoak diren teknologia guztien eragiketa integratua frogatzea.* ITERek eskala txikiko fusio-gailu esperimentalen eta etorkizuneko fusio nuklearreko erreaktoreen arteko jauzia gainditzeko duen zubi bat izan behar du. Zientzialariek erreaktore komertzialetan aurkituko dituzten antzeko baldintzetan aztertu ahal izango dituzte plasmak. Era berean, berotze-, kontrol-, diagnostiko-, kriogenia- eta urruneko mantentze-teknologiak modu integratuean probatuko dira.
- *Deuterio-tritio plasma bat lortzea, non erreakzioa berezko beroketa-ren bidez soilik mantentzen den (plasma gorria).* Gaur egun, fusioari buruzko ikerketa plasma gorria egoera esploratzeko atalasean dago; egoera horretan, fusio-erreakzioen beroa bera plasmaren baitan konfinatzen da, erreakzioa modu eraginkorrean denbora luzez mantentzeko. Zientzialariek ITERen hori gertatzeaz gain, plasma denbora luzeagoetarako egonkor egotea espero dute.
- *Tritioa birsortzeko sistema aztertzea.* ITER eragiketaren azken pausotako misio garrantzitsuenetako bat huts-ganberaren barruan tritioa ekoiztea bideragarria dela erakustea izango da. ITERen planteatutako deuterio-tritio fusio-erreaktziorako, munduko Tritio hornidura ez da nahikoa etorkizuneko fusio-erreaktoreen beharrak kontuan hartzen badira, eta ITERek aukera paregabea emango du fusio-ingurune errealean tritioa birsortzeko bilgarrien diseinuak aztertzeko.
- *Fusio-erreaktore baten segurtasun-ezaugarriak erakustea.* 2012an ITER erakundeak Frantzia operadore nuklear gisa lizentziamendua lortu zuen eta ITER erreaktorea segurtasun-probak arrakastaz

gainditu dituen munduko lehen erreaktorea bihurtu zen. ITERen helburuetako bat plasmaren eta fusio-erreakzioen kontrola frogatzea izango da, ingurumenean ondoriorik izan ez dezaten.

4. FUSIO MATERIALEN LABORATEGIA BILBOKO INGENIARITZA ESKOLAN

4.1. Asetzen dituen beharrak

Konfinamendu magnetikoaren bidezko fusio nuklearra bideragarria izan dadin, erreaktoreen bizitza erabilgarria eta erabilgarritasuna behar bezain handiak izan behar dira. Helburu hori lortzeko, ezinbestekoa da materialak modu egokian aukeratzea. ITER bezalako fusio-planten bideragarritasun-azterketak egiten direnean, funtsezkoa da alderdi kritikoak kuantifikatzea, hala nola instalazioaren segurtasuna, tritioa birsortzeko gaitasuna, erregaiaren ekonomia edo plasmaren egonkortasuna, eta nabaria da materialak behar bezala aukeratzeak baldintzatzen dituela alderdi horiek guztiak.

Etorkizuneko fusio-planten osagaiak osatuko dituzten materialak hidrogeno-isotopoekin interakzioan egongo dira (deuterioa eta tritioa) eta interakzio hori ezagutzea ezinbestekoa da zenbait arrazoiengatik:

- Alde batetik, segurtasunaren ikuspegitik, funtsezkoa baita tritioak ez dezala ingurura ihes egin materialean zehar, erradioaktiboa baita.
- Horrez gain, metalen eta hidrogeno-isotopoen arteko interakzioak tritioa birsortzeko bideragarritasuna baldintzatzen duelako, eta horrek, sistema osoaren bideragarritasuna, esan bezala, erregai hau mugatua baita. Sortutako tritioa jaso eta behar bezala garraiatu behar da, difusio- edota absortzio- galera nabarmenik izan gabe, eta horregatik, gasaren ezaugarri horiek aldeztu aurretik menperatu behar dira.
- Gainera, hormen barruko gasaren portaerak plasmaren egonkortasuna ere baldintzatuko duelako.
- Azkenik, aipatu den moduan, fusio-erreakzioek erreaktorearen egiturazko materialen aktibazio neutronikoa ekarriko dutelako, erradioaktibo bihurtuko ditu, eta, gainera, haren atomoak egitura-posiziotik lekualdatuko ditu, egitura ahulduz. Ondorioz, aldizka ordezkatu behar izango dira, eta hondakin erradioaktiboak kokalekutik kanpo lurperatu beharko dira. Dena den, egia da hondakinen kilogramo bakoitzeko erradioaktibitate-maila fusio-erreaktoreen hondakinen kasuan baino askoz txikiagoa izango dela, baina hondakinen bolumena eta masa, askotan, handiagoak izango lirateke. Hori dela eta, zenbait programak eta ikerkuntza-zentrok honen harian egiten dute lan, eta

aktibazio baxuko aleazio estrukturalak garatzen dituzte, erreaktoreetatik baztertutako materialak aktibitate baxuko hondakin erradioaktibotzat hartzea ahalbidetuko luketenak, eta, beraz, lurperatuta desgerraraz daitezkeenak [11-13].

Baldintza guztiak kontuan hartuz, ITERen estentsiboki erabiliko den egitura-materialetako bat aktibazio neutroniko baxuko altzairu ferritiko-martentsitikoa izango da, beharrezko ezaugarri guztiak biltzen baititu, eta proposamen gehienetan aurkeztu baita [14]. Beraz, funtsezkoa da material horietan hidrogeno-isotopoen garraio parametroak ezagutzea eta altzairu horien zeharreko hidrogeno-isotopoen permeazio-fluxuak menperatzea. Halaber, ezinbestekoa da fluxu horietan eragina izan dezaketen faktoreak ezagutzea: besteak beste, presioa, temperatura, materialek jasotako tratamendu termikoak eta mikroegiturak.

Hala ere, neurketa horiek egiteko hainbat arlo menderatu eta denbora eta ahalegin handia eman behar dira, eta, horregatik, puntako ikerketa-zentro ugariak daramatzate material horiek aztertzen eta ezaugarritzen. Haiekin batera Fusio Materialen Laborategia arduratzen da horietaz guztiaz, hain zuzen ere, eta horretarako lau instalazioekin egiten du lan helburu desberdinak lortzeko.

4.2. Taldearen aurrekariak

Fusio Materialen Laborategia Euskal Herriko Unibertsitateko Ingeniaritza Energetikoaren Sailari dagokio, eta 2003 urteaz geroztik, hidrogenoaren isotopoei fusio-termonuklear teknologiako materialekin duten interakzioa aztertzeko ikerlerro bat garatzen ari da. Haren helburu nagusia fusio-teknologiako material berriekin kontaktuan dagoen tritioaren portaera karakterizatzea eta aurreikustea da.

Fusio Materialen Laborategiaren jatorria Europako Batzordearen Joint Research Centre (JRC-Ispira) ikerketa-zentroaren instalazioen lekualdatzean dago, bere garaian handik bi ekipo (permeazio-ekipoa eta absortzio-desortzio-ekipoa) ekarri zirenean UPV/EHUra. Lekualdaketa hori Zientzia eta Teknologia Ministerioak finantzatutako Ekintza Berezi baten bidez (FTN2002-10520-E) eta UPV/EHUren ikerketa-proiektu baten bidez egin zen (1/UPV 00149.345-E-15270/2003). Ondoren, egungo Fusio Materialen Laborategia osatzen duten bi ekipo berri gehitu ziren: desortzio termiko programatuko (TDS) ekipoa eta absortzio-desortzio automatizatuko ekipoa.

Instalazio horietan burututako neurri esperimentalek 40 ekarpen baino gehiago eraman dituzte kongresuetara, eta haiei esker, 8 Euroreport eta 20 artikulua baino gehiago argitaratu dira izen handiko aldizkarietan [7, 15-31].

Ikerketa-taldeak EFDAk (European Fusion Development Agreement) finantzatutako ikerketa-proiektuetan aktiboki parte hartu zuen 2006tik. Akordio horren ondorioz Europar Batasuneko eta Suitzako ikerketa-erakunde nazionalen egungo partzuergo europarra sortu zen, EUROfusion. 2019tik aurrera taldeak Europako proiektuetan modu aktiboan parte hartzen du, EUROfusionen finantziazioa jasotzen duten hainbat zeregin garatuz. Gainera, CIEMATen (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) lankidetzarekin, EUROfusionen zereginak partekatzen dira eta, hortaz, CIEMATen baliabide teknologikoak erabiltzeko aukera ere badu taldeak (laginak prestatzeko, mikroegituraren analisia garatzeko, eta abar).

Aurreko atalean azaldu den moduan, hidrogeno-isotopoak fusio-erreaktoreen materialetan zehar garraiatzeak bere funtzionamendua baldintzatzen du. Ikuspegi erradiologikotik erreaktorean jarduten duten langileei eskaini beharreko babesaz gain, isotopoak materialetan zehar garraiatzearen balantze garbia funtsezko faktorea baita erreaktorearen elementuak diseinatzeko, begizta itxian funtzionatzen duen erregai-zikloan eragin zuzena baitu. Ildo horretan, prozesu horren funtsezko elementua tritioaren autosufizientzia bermatzeko bilgarri birsortzailea da eta bilgarrietarako proposatzen diren diseinu gehienetan, aktibazio neutroniko baxuko altzairu ferritiko-martensitikoa erabiliko da egiturazko material moduan [32, 33].

Gaur egun Laborategian hidrogenoa altzairu horietan garraio-parametroak esperimentalki neurtzen ari dira, solubilitatea, permeazioa eta difusibitatea definitzeko erregimen difusiboetan, eta adsortzio- eta birkonbinazio-konstanteak eta solubilitatea gainazal-erregimenetan, baita horietan eragina izan dezaketen faktoreak ere.

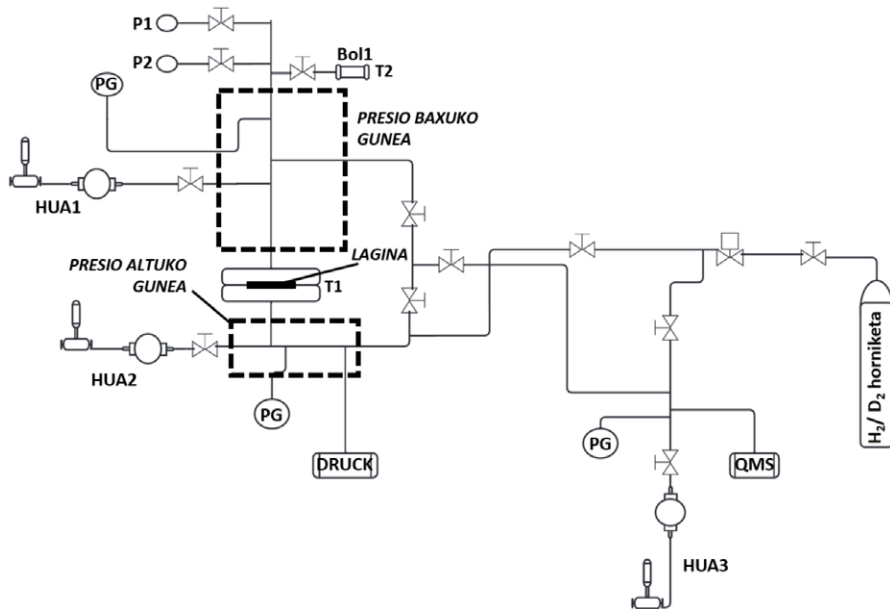
4.3. Laborategiaren deskribapena

Fusio Materialen Laborategiak, esan bezala, lau instalazio ditu entseguak egiteko, eta hiru taldetan banatu daitezke: alde batetik, instalazioetako batek permeazio-entseguak burutzeko balio du; beste instalazio batek desortzio-termikoko entseguak burutzeko, eta azkenik, gainerako bi instalazioek adsortzio-desortzio-entseguak egiteko balio dute.

Hurrengo ataletan instalazioen deskribapen labur bat egingo da.

4.3.1. Permeazio-instalazioa

Permeatutako gasaren teknika nazioarteko taldeetan tradizionalki sarritan erabili izan den teknika da. Gaur egun, teknologikoki guztiz gaurkotua, UPV/EHU n erabiltzen da, 3. irudiak erakusten duen moduko instalazio batean.

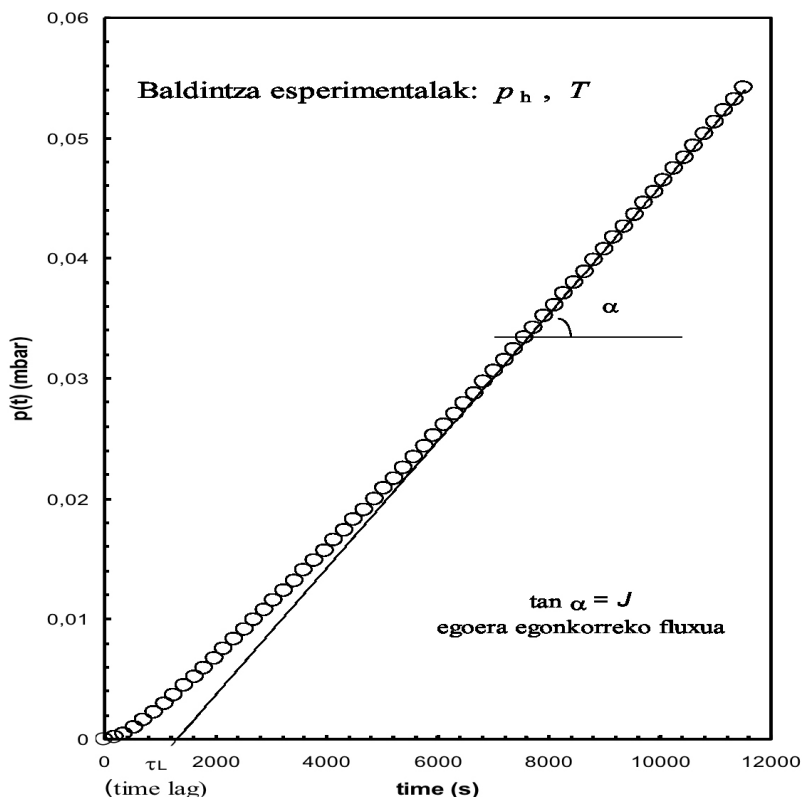


3. irudia. UPV/EHU-ren permeazioa neurtzeko instalazioaren irudi eskematikoa [egileek sortua].

Saiakuntza aztertu nahi den materialaren mintz mehe bat erabiliz egiten da. Lagin hori permeazio-zutabea deritzon egituran finkatzen da, zutabearen alde bietan huts-ultra-altuko (HUA) baldintzak lortu ondoren 3 ponpaketa-talde erabiliz. Ideia bat izateko, instalazioaren ezaugarriak eta ponpaketa-gaitasuna kontuan hartuz, hutsaren balio egokitzat permeazio-zutabeko presio altuko gunean $1,1 \times 10^{-7}$ mbar eta presio baxuko gunean $5,0 \times 10^{-8}$ mbar onartzen dira.

Baldintza horietatik abiatuta, saiakuntza bera abian jartzen da: laginaren behealdetik (presio altuko gunea) gasa sarrarazten da presio jakin batean, eta gasak laginean zehar goialderantz (presio baxuko gunerantz) permeatzen du. Presio altu konstantepean dagoen gasak permeazio-prozesua behartzen du laginean zehar, eta horri esker gasak presio baxuko gunera permeatzen du. Permeatutako fluxuak era jarraituan handitzen du bere balioa denbora-tarte batez (erregimen iragankorra), fluxuaren balio konstante batean egonkortu arte (egoera egonkorra). Bitartean, bi manometrok (P1 eta P2) presio baxuko gunean gertatzen den presio-handitzea neurtzen dute denboran zehar, permeatutako gas kantitatea eta emandako fluxua kuantifikatzeko helburuarekin. Aurretik aipatu diren pausuak presio eta tenperatura ezberdinetan errepikatzen dira, garrantzitsua baita haiekiko erlazioa ezagutzeari.

Denboran zehar presio baxuko gunean gertatzen den presio-handitzearen modelizazioari esker, saiakuntzako material-gas konbinaketaren garraio-parametroak lortzen dira. 4. irudiak permeazio-kurba tipikoa erakusten du.



4. irudia. Permeazio-kurba tipikoa: presio baxuko gunearen presio-handitzea denboran zehar. Erregimen iragankorra eta egoera egonkorra (malda konstanteduna) bereizten dira [egileek sortua].

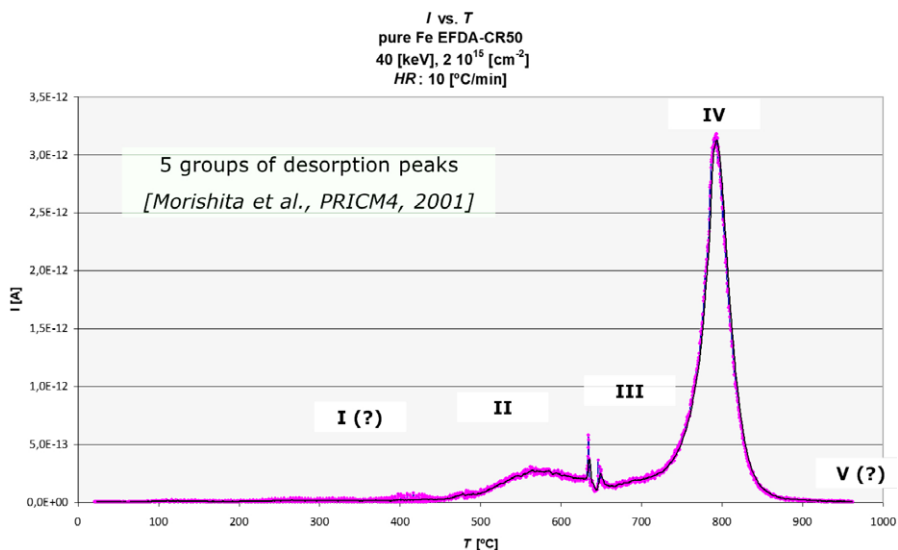
Materialean zehar suertatzen den permeazioa bi prozesuk muga dezakete [14]: alde batetik, materialean zehar gasaren zirrikitu-difusioak muga dezake. Horrela bada, difusioak mugatutako erregimena izendatzen da; beste aldetik, material solidoaren gainazalean gertatzen diren adsortzio-disoziazioen eta desortzio-birkonbinazioen ondoriozko erreakzio fisiko-kimikoek muga dezakete. Kasu horretan gainazalak mugatutako erregimena dugula esaten da. Edozelan ere, garrantzitsua da alde zuretik ezaugarri horiek guztiak ondo menperatzea etorkizuneko errektoreetan gertatuko diren egoerak aurreikusteko.

4.3.2. TDS (Thermal desorption spectrometry) instalazioa

Desortzio termikoko espektrometria teknikaren bidez, material desberdinen helio-desortzio tenperaturak lor daitezke. Izan ere, materialen barnean helioa sor daiteke fusio-erreaktore batean egotean eman ahal diren azpierreazioen kausaz, eta hala gertatzen bada, materialen propietateak alda ditzake. Hortaz, helio hori askatu beharra dago, eta hori lortzeko modu bat materiala berotzean datza. Arazoa da material bakoitzak tenperatura desberdinetan askatzen duela bere barnean sortutako helioa, eta hori ezagutzeko TDS instalazioa erabiltzen da.

Materialean aldeztu aurretik helioa ezartzen da zenbait keV-eko energia-ekin; behin helio ezarpena bukatzen denean, lagina TDS-instalazioan sartzen da, eta ponpa turbomolekular ezberdinen bidez HUA baldintzak lortzen dira. Ondoren, lagina 10 °C/min-ko maldarekin berotzen hasten da, eta masa-espektrometro baten bidez (Quadrupole Mass Spectrometer, QMS) helioaren desortzioa jasotzen da, materialaren barnetik askatutako gasa denboran zehar kuantifikatuz tenperatura desberdinekiko.

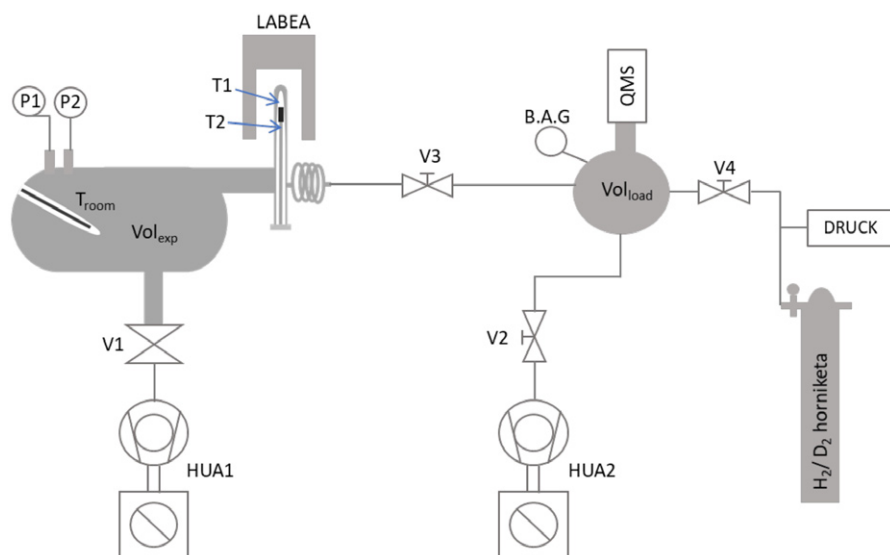
5. irudian, ikus daiteke lortutako kurbaren adibide bat, non argi nabaritzen den materialak gas gehiena 800 °C-tan askatu duela, eta hori izango dela, beraz, interesatzen den tartea.



5. irudia. TDS instalazioaren desortzio kurba baten adibidea [egileak sortua].

4.3.3. Absortzio-desortzio instalazioa

Absortzio-desortzio instalazioaren bidez material desberdinen hidrogeno garraio-parametroak lor daitezke. Erabilitako materiala PbLi eutektikoa izan daiteke, material honek disolbagarritasun baxua eta migrazio zinetika motela baititu erabilera-tenperaturan. Ezaugarri horien ondorioz hidrogenoaren garraio parametroak askaturiko hidrogeno kantitatea (aurretik xurgatu duena, aurreko kasuan bezala) modelatzen duen teknikaren bidez ezaugarritzen dira. Erabilitako instalazioaren eskema ikus daiteke 6. irudian.

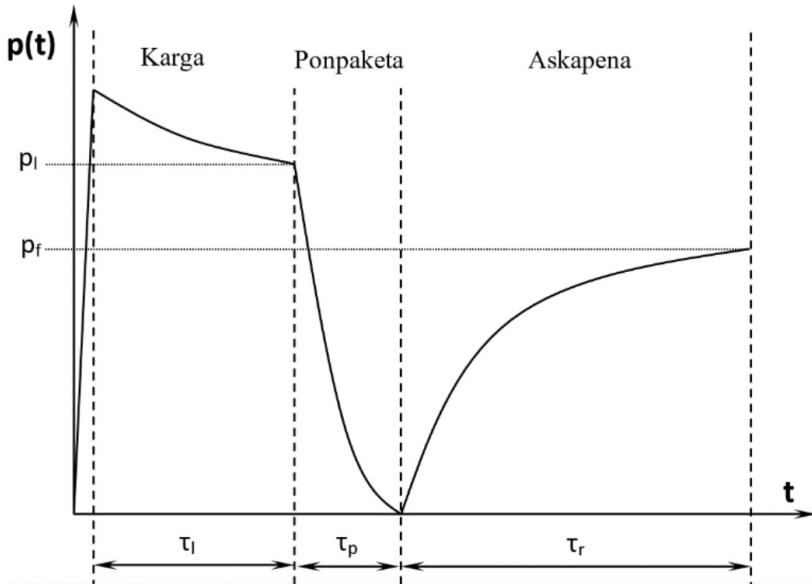


6. irudia. Absortzio-desortzio instalazioaren eskema [egileak sortua].

Entsegu bakoitzean honako pausu hauek jarraitzen dira: lehenik eta behin, berriz ere HUA baldintzak lortzen dira Vol_{exp} bolumenean; ondoren, bolumen horretan hidrogenoa edo deuterioa sartzen da desiratutako presiora, eta behin hori finkatuta, gasa sartzeari utzi eta presioaren jaitsiera erregistratzen da denboran zehar, laginak gasa xurgatzen hasten duenaren adierazgarri.

Hurrengo pausoa Vol_{exp} bolumenean dagoen gainerako gasa ateratzea eta berriro HUA baldintzetara bueltatzea izango da. Behin hau lortuta laginak xurgatutako hidrogenoa Vol_{exp} bolumenean askatzen hasiko du, eta horrek presioa igotzea eragingo du. 7. irudian entsegu baten presio-aldaketa denboran zehar ikus daiteke, eta datu horietatik hidrogenoaren garraio-parametroak lor daitezke, erreaktorearen funtzionamendu egokia bal-

dintzatuko dutenak. Han, presio eta denbora eskala desberdinak erabili dira fase bakoitzerako irudi bakarrean prozesu osoa ulertzeko asmoarekin. τ_l , τ_p eta τ_r karga, ponpaketa- eta askapen-denborak dira, hurrenez hurren, eta p_l eta p_f ganbaran neurtutako presioak karga prozesuaren eta askapen faseen amaierako puntuetan.



7. irudia. Absortzio-desortzio prozesu osoaren garapena gagozkion faseekin [egileek sortua].

4.3.4. PCTPro 2000 instalazioa

PCTPro 2000 gailua absortzio-desortzio instalazioa da, aurrekoaren modukoa, baina automatikoa izatearen abantailarekin. Instalazio horrek, lagina sartuta eta gasaren presioa erabakita, hidrogenoaren garraio-parametroak lor ditzake balbulek eta gainerako gailuek automatikoki ezarritako prozeduraren bidez. Gainera, gailu horretan, aurrekoan entseatzeko diren materialez gain, hauts-itxurako materialak ere entsea daitezke.

Instalazioaren argazki bat ikus daiteke 8. irudian.



8. irudia. PCTPro 2000 adsortzio-desortzio instalazio automatikoa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] O. UNIVERSITY, «Our World in Data» [en línea]. Available: https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy?country=~OWID_WRL.
- [2] N. CUNNINGHAM, «Benefits of Fusion», *Fusion 2020, American Security Project*, 2012. Available: <https://www.americansecurityproject.org/benefits-of-fusion/>.
- [3] K. TOKIMATSUA, J. FUJINO, S. KONISHI, Y. OGAWA eta K. YAMAJI, «Role of nuclear fusion in future energy systems and the environment under future uncertainties», *Energy Policy*, vol. **31**, n.º 8, pp. 775-797, 2003.
- [4] T. HAMACHER, M. HUBER, J. DORFNER, K. SCHABER eta A. M. BRADSHAW, «Nuclear fusion and renewable energy forms: Are they compatible?», *Fusion Engineering Design*, vol. **88**, pp. 657-660, 2013.
- [5] I. T. TERESA DE LOS ARCOS, *Plasma: Cuarto Estado de la Materia*, Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España), 2011.
- [6] E. d. I. Fuente, *Manual de Tecnología Nuclear para Periodistas*, Madrid: Foro Nuclear, 2004.
- [7] I. PEÑALVA, *Influencia de los componentes metalúrgicos C, Cr y P en la permeabilidad del hidrógeno para aleaciones férreas*, Bilbao, 2017.

- [8] EUROPEAN COMMISSION, «Critical Raw Materials Act», DEKLARAZIOA/22/5523, 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_22_5523.
- [9] «ITER» [en línea]. Available: <https://www.iter.org/>.
- [10] LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY. National Ignition Facility and Photon Science, «Star Power: Blazing the Path to Fusion Ignition», 2023. <https://lasers.llnl.gov/news/star-power-blazing-the-path-to-ignition>.
- [11] D. JASSBY, «Fusion reactors: Not what they're cracked up to be», *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2017. <http://thebulletin.org/fusion-reactors-not-what-they%E2%80%99re-cracked-be10699>.
- [12] «IFMIF/EVEDA», <https://www.ifmif.org/>.
- [13] «IFMIF-DONES Granada», <https://ifmif-dones.es/es/>.
- [14] J. F. FERNÁNDEZ, *Development and numerical implementation of tritium and helium transport models in liquid metal breeders for nuclear fusion technology applications*, Barcelona, 2012.
- [15] G. A. ESTEBAN, L. A. SEDANO, A. PERUJO eta K. DOUGLAS, «Study of Isotope Effects in the Hydrogen Transport of an 8% CrWVTa Martensitic Steel,» *physica status solidi (a)*, vol. **184**, n.º 2, pp. 409-418, 2001.
- [16] G. VEREDAS, J. FRADERA, I. FERNÁNDEZ, L. BATET, I. PEÑALVA, L. MESQUIDA, J. ABELLÀ, J. SEMPERE, I. MARTÍNEZ, B. HERRAZTI eta L. SEDANO, «Design and qualification of an on-line permeator for the recovery of tritium from lead–lithium eutectic breeding alloy,» *Fusion Engineering and Design*, vol. **86**, n.º 9-11, pp. 2365-2369, 2011.
- [17] I. PEÑALVA, J. AZKURRETA, M. PÉREZ, N. ALEGRÍA, F. LEGARDA, M. MALO eta D. RAPISARDA, «Caracterización de los parámetros de transporte de hidrógeno y deuterio en el acero ferrítico-martensítico de baja activación neutrónica EUROFER,» *Nuclear España-Mejores ponencias de la Reunión Anual de la SNE*, pp. 1-4, 2022.
- [18] R. SACRISTÁN, G. VEREDAS, I. BONJOCH, I. PEÑALVA, E. CALDERÓN, G. ALBERRO, D. BALART, A. SARRIONANDIA-IBARRA, V. PÉREZ, A. IBARRA eta F. LEGARDA, «Fuskite® preliminary experimental tests based on permeation against vacuum for hydrogen recovery as a potential application in Pb15.7Li loop systems,» *Fusion Engineering and Design*, vol. **89**, n.º 7-8, pp. 1551-1556, 2014.
- [19] G. ESTEBAN, G. ALBERRO, A. P. I. PEÑALVA, F. LEGARDA eta B. RICCARDI, «Hydrogen transport and trapping in the GlidCop Al25 IG alloy,» *Fusion Engineering and Design*, vol. **84**, pp. 757-761, 2009.
- [20] I. PEÑALVA, N. ALEGRÍA, F. LEGARDA, C. ORTIZ eta R. VILA, «Quantification of the influence of the C, Cr and P contents on the permeability of hydrogen through Fe alloys,» *Nuclear Materials and Energy*, vol. **30**, pp. 101116, 2022.
- [21] G. ALBERRO, I. PEÑALVA, A. SARRIONANDIA-IBARRA, F. LEGARDA eta G. ESTEBAN, «Experimental determination of solubility values for hydrogen isotopes in eutectic Pb-Li,» *Fusion Engineering and Design*, Vols. % 1 de % 298-99, pp. 1919-1923, 2015.

- [22] G. A. ESTEBAN, G. ALBERRO, I. PEÑALVA, F. LEGARDA eta B. RICCARDI, «Hydrogen transport and trapping in the GlidCop Al25 IG alloy,» *Fusion Engineering and Design*, vol. **84**, pp. 757-761, 2009.
- [23] G. A. ESTEBAN, F. LEGARDA eta A. PERUJO, «Isotope Effect in hydrogen transport in bcc-structured materials: polycrystalline tungsten and reduced activation ferritic-martensitic steel,» *Fusion Science and Technology*, vol. **48**, pp. 12-17, 2005.
- [24] G. A. ESTEBAN, G. ALBERRO, I. P. A. PEÑA, F. LEGARDA eta B. RICCARDI, «Migración y retención de hidrógeno en la aleación de cobre ITER-grande Glidcop Al-25,» *Nuclear España-Las mejores ponencias de la 34 Reunión Anual de la SNE*, vol. **294**, pp. 33-35, 2009.
- [25] G. A. ESTEBAN, A. PERUJO eta F. LEGARDA, «Study of the Isotope Effects in the Hydrogen Transport in Polycrystalline Tungsten,» *Materials Science Forum*, Vols. % 1 de % 2480-481, pp. 537-542, 2005.
- [26] I. PEÑALVA, G. ALBERRO, J. ARANBURU, F. LEGARDA, J. SANCHO, R. VILA eta C.J. ORTIZ, «Influence of the Cr content on the permeation of hydrogen in Fe alloys,» *Journal of Nuclear Materials*, vol. **442**, n.º 1-3, pp. S719-S722, 2013.
- [27] I. PEÑALVA, G. ALBERRO, F. LEGARDA, C. ORTIZ eta R. VILA, «Influence of the P content on the transport parameters of hydrogen in Fe alloys,» *Fusion Engineering and Design*, Vols. %1 de %298-99, pp. 2058-2062, 2015.
- [28] I. PEÑALVA, G. ALBERRO, F. LEGARDA, R. VILA eta C. ORTIZ, «Influence of Cr content on the diffusive transport parameters and trapping of hydrogen in Fe alloys,» *Fusion Engineering and Design*, vol. **89**, n.º 7-8, pp. 1628-1632, 2014.
- [29] I. PEÑALVA, G. ALBERRO, G. A. E. F. LEGARDA eta B. RICCARDI, «Interaction of Copper Alloys with Hydrogen,» de *Copper Alloys - Early Applications and Current Performance - Enhancing Processes*, London, 2012, pp. 31-48.
- [30] I. PEÑALVA, G. ALBERRO, F. LEGARDA, C. ORTIZ eta R. VILA, «Influence of the C content on the permeation of hydrogen in Fe alloys with low contents of C,» *Nuclear Materials and Energy*, vol. **9**, pp. 306-310, 2016.
- [31] M. PÉREZ, *Análisis de la permeabilidad del protio y del deuterio en el acero ferrítico-martensítico de activación reducida EUROFER: validación de la influencia isotópica del hidrógeno*, Bilbao, 2021.
- [32] F. L. TABARÉS, *Lithium: Technology, Performance and Safety*, Nova Science Publishers INC, 2013.
- [33] L. GIANCARLI, M. ABDU, D. CAMPBELL, V. CHUYANOV, M. AHN, M. ENOEDA, C. PAN, Y. POITEVIN, E. R. KUMAR, I. RICAPITO, Y. STREBKOV, S. SUZUKI, P. WONG eta M. ZMITKO, «Overview of the ITER TBM Program,» *Fusion Engineering and Design*, vol. **87**, pp. 395-402, 2012.