

Trícium szaporításhoz kapcsolódó fejlesztések

*Ilkei Tamás¹, Bodnár Gábor¹, Baross Tétény¹, Kiss Béla², Piros Attila⁴,
Porempovics Gábor³, Recski János⁴, Rovni István²*

¹MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út. 29-33.

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

³Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

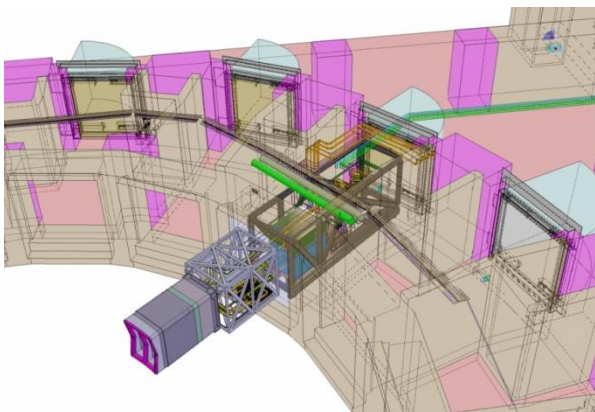
⁴C3D Műszaki Tanácsadó kft.

1106 Budapest, Fehér út 10.

Az ITER után építendő demonstrációs fúziós reaktor (DEMO) elengedhetetlen részét képező köpenye a plazma körül helyezkedik el, a vákuumkamrát béleli ki. Feladata a plazma elektromágneses és neutron sugárzásának elnyelése, hővé alakítása valamint lítium tartalmú anyagokból magreakciókkal a plazma működtetéséhez szükséges trícium termelése. Ez alapvetően szükséges egy áramtermelő fúziós reaktorhoz, mivel az deutérium-trícium (D-T) reakcióval működne, és trícium a természetben csak elenyésző mennyiségben áll rendelkezésre. A trícium szaporító kazetták a reaktor teljes belső falát beburkolnák, így egy trícium termelő köpenyt alkotnának. Az eddigi fúziós kísérletek vagy csak tiszta deutérium plazmával működtek, vagy rövid D-T működést demonstráltak, így trícium termelésre nem volt sem szükség, sem lehetőség. Az ITER kísérlet lehetővé teszi trícium szaporító teszt kazetták (Test Blanket Module, TBM) vizsgálatát, melyek európai változatainak fejlesztésében a magyar mérnökök hatékony szerepet vállaltak. A cikk az ITER TBM-ek általános bemutatása mellett a széleskörű magyar részvétellel foglalkozik.

Trícium szaporítás az ITER-ben

Az ITER három - a vízszintes középsíkjában elhelyezkedő - nyílásban (ekvatoriális port) egyidejűleg 6 (portonként 2) különböző kialakítású TBM tesztelésére lesz lehetőség. Ezen tesztekben az ITER összes tagja (Amerikai Egyesült Államok, Dél-Korea, Európa, India, Japán, Kína, Oroszország) részt vesz. Európa jelentős közreműködésének és a fúziós kutatásokban betöltött vezető szerepének köszönhetően, egyedülállóan az ITER tagok között, két kazettát üzemeltethet majd folyamatosan.

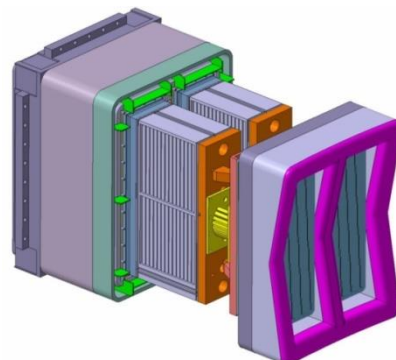


1. ábra: TBM rendszer a 16-os ekvatoriális portban

A következő hat TBM kerül beépítésre az ITER-be:

- hélium hűtésű kerámia szaporító (HCCB) és lítium-ólom kerámia szaporító (LLCB) a 2-es számú ekvatoriális portba
- hélium hűtésű lítium-ólom szaporító (HCLL) és hélium hűtésű kerámia ágyas szaporító (HCPB) a 16-os számú ekvatoriális portba
- Víz hűtésű kerámia szaporító (WCCB) és kettőshűtésű lítium-ólom szaporító (DCLL) a 18-as számú ekvatoriális portba

Egy TBM doboz befoglaló méretei: 1,66 m (poloidális) × 0,48 m (toroidális) × 0,5/0,7 m (radiális) irányokban.



2. ábra: Kettő vízszintes elrendezésű TBM modul a portban

HCCB TBM

A HCCB TBM [1] - Kína által fejlesztett - Li_4SiO_4 kerámia golyócskákat, mint trícium szaporítót, berillium kerámia golyócskákat, mint neutron sokszorozót és alacsony aktiválású ferrites-martenzites (Reduced Activation Ferritic-Martensitic - RAFM) acélt, mint szerkezeti anyagot tartalmaz. A lítium komponens 80%-ban dúsított lítium-6 izotópot tartalmaz. Maximális hőmérséklet $900\text{ }^\circ\text{C}$ a kerámián belül, $600\text{ }^\circ\text{C}$ berilliumban, és $550\text{ }^\circ\text{C}$ az acél szerkezetben.

LLCB TBM

Az LLCB TBM [1] - India által fejlesztett és Oroszország által támogatott - ötvözi a szilárd és folyékony szaporítású TBM kialakítások jellemzőit. Li_2TiO_3 kerámia golyócskákat is és Pb-16Li eutektikus folyékony ötvözetet is, mint trícium szaporítót, valamint RAFM acélt, mint szerkezeti anyagot tartalmaz. A lítium komponens a kerámia golyócskákban 30-60%-ban, a Pb-16Li-ben 90%-ban dúsított lítium-6 izotópot tartalmaz. Kettős hűtés biztosítja a megfelelő hőmérsékletet: hélium hűtés az első fal és a doboz szerkezetének (8 MPa , $T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 300/350\text{ }^\circ\text{C}$) és Pb-16Li hűtés a kerámia szaporító ágynak ($T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 300/480\text{ }^\circ\text{C}$). A Pb-16Li továbbá trícium szaporítóként és neutron sokszorozóként is szolgál a rendszerben.

HCLL TBM

A HCLL TBM [1] - Európai Unió által fejlesztett - folyékony Pb-16Li ötvözetet, mint trícium szaporítót és neutron sokszorozót valamint Eurofer acélt, mint szerkezeti anyagot tartalmaz. A lítium komponens 90%-ban dúsított lítium-6 izotópot tartalmaz. A trícium kinyerését a Pb-16Li ötvözet lassú áramoltatásával oldják meg a trícium szaporító kazettából. A kazetta szerkezeti elemeit, egy független, hélium gázt (8 MPa , $T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 300/500\text{ }^\circ\text{C}$) keringtető rendszerrel hűtik.

HCPB TBM

A HCPB TBM [1] - Európai Unió által fejlesztett - Li_4SiO_4 vagy Li_2TiO_3 kerámia golyócskákat, mint trícium szaporítót, berillium kerámia golyócskákat, mint neutron sokszorozót és Eurofer acélt, mint szerkezeti anyagot tartalmaz. Li_4SiO_4 esetében a lítium komponens 30%-ban, az Li_2TiO_3 esetében a lítium komponens 60%-ban dúsított lítium-6 izotópot tartalmaz. Maximális hőmérséklet $920\text{ }^\circ\text{C}$ a kerámián belül, $650\text{ }^\circ\text{C}$ berilliumban, és $550\text{ }^\circ\text{C}$ az acél szerkezetben. A hélium részben a hűtést (8 MPa nyomáson $T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 300/500\text{ }^\circ\text{C}$) biztosítja, részben a keletkező trícium kivonását oldja meg.

WCCB TBM

A WCCB TBM [1] - Japán által fejlesztett - Li_2TiO_3 kerámia golyócskákat, mint trícium szaporítót, berillium kerámia golyócskákat, mint neutron sokszorozót és F82H acélt, mint szerkezeti anyagot tartalmaz. A lítium komponens 30%-ban dúsított lítium-6 izotópot tartalmaz. Maximális hőmérséklet $900\text{ }^\circ\text{C}$ a kerámián belül, $600\text{ }^\circ\text{C}$ berilliumban, és $550\text{ }^\circ\text{C}$ az acél szerkezetben. A hűtés vízzel történik nyomott vizes reaktorban használtknak megfelelően ($T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 280\text{ }^\circ\text{C} / 325\text{ }^\circ\text{C}$).

DCLL TBM

A DCLL TBM [1] - Amerikai Egyesült Államok által fejlesztett és dél-koreai interfész koordinációban támogatott - F82H

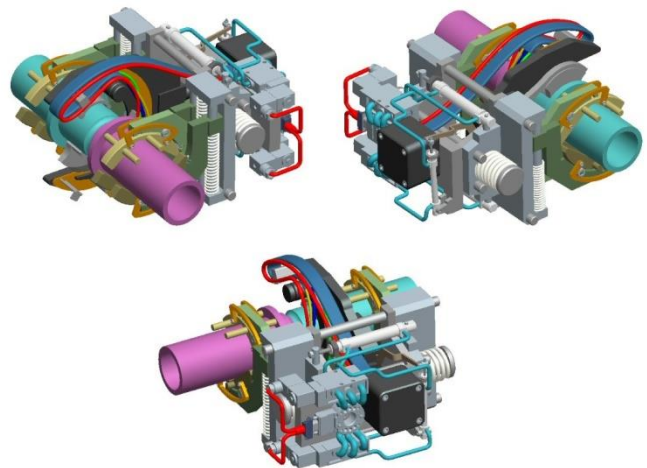
acél szerkezetből áll, melynek kettős hűtését a hélium 8 MPa nyomáson $T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 300/500\text{ }^\circ\text{C}$ és Pb-16Li $T_{\text{bemeneti}}/T_{\text{kimeneti}} 460/650\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleteken biztosítják. A Pb-16Li egyben trícium szaporítóként és neutron sokszorozóként is szolgál a rendszerben. A lítium komponens 90%-ban dúsított lítium-6 izotópot tartalmaz.

Magyar részvétel az ITER TBM európai változatainak fejlesztésében

TBM kiszolgáló egységének (AEU) fejlesztése és port kamra integrációja

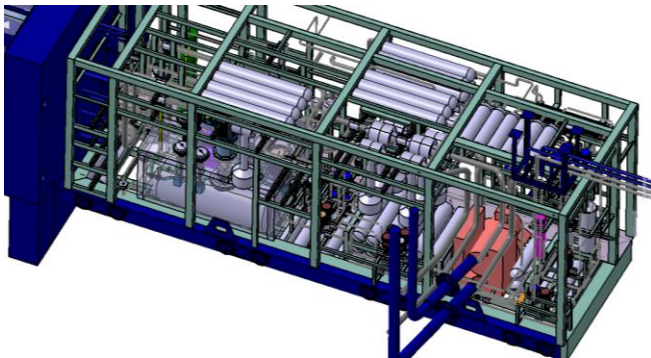
Az európai HCPB és HCLL TBM-ek számára kiszolgáló alrendszerek biztosítják a hélium keringtetését, a Pb-16Li keringtetést, a trícium kivonást, a hűtőközeg tisztítását és a kezelő-, irányítórendszereket. Ezek nagyrészt a port kamrán belül (Port Cell) helyezkednek el egy közös keretrendszerbe Ancillary Equipment Unit (AEU) integrálva. Ez a keretrendszer tartalmazza továbbá a hűtő-, Pb-16Li keringtető- és trícium kivonó rendszer csövezéseit, gázkeverőket, szelepeket és biztonsági tartályokat is, továbbá a karbantartási igényeknek megfelelő kialakítást, mely biztosítja az időszakos karbantartások során a hozzáférést az alrendszerekhez és a 2-3 évente esedékes TBM cserék során az alrendszerek eltávolítását és installálását.

A TBM-ek karbantartása, installálása és eltávolítása nagyon komplex műveleteket igényelnek, melynek kidolgozásában a magyar mérnököknek nagy szerepe volt. Egy összetett tanulmány készült, mely távvezérléssel gyorsan megvalósítható megoldásokat mutat be a TBM-ek kiszedési és behelyezési feladatainak elvégzésére. A 2 európai TBM rendszer csatlakoztatási műveletei 18 darab acélcső összehegesztése, hegesztés előtti pozicionálásuk, varratok ellenőrzése, majd hőszigetelés felhelyezése. Először a csöveket pozicionáló, majd hegesztés közben rögzítő, robotkarral működtethető szerszámok koncepciója lett kidolgozva, majd látva a hosszú műveleti időket, készült egy új megoldás, melyben a csövek pozicionálását nem egy speciális robotkarral működtetett szerszám végzi egyesével, hanem 1-1 pozicionáló sablonban kell a csöveket rögzíteni, majd a sablonok egymáshoz illesztésekor az összes cső a megfelelő pozícióba kerül. A hegesztési, vágási, varratellenőrzési és hőszigetelés felrakási feladatokhoz is ki lett dolgozva egy-egy távműködtetésű célszerszám koncepciója [2].



3. ábra: Távvezérlésű csőhegesztő robot megfogó terve

A magyar mérnökök feladata volt a TBM-ek kiszolgáló rendszereit tartalmazó keretrendszer, az AEU fejlesztése is [3]. Fő feladat volt az alrendszerek optimalizált elhelyezése az AEU-n belül, mely lehetővé teszi a karbantartó személyzet és a távkezelő berendezések bejutását és hozzáférését az összes alkatrészhez. Ugyanakkor a nukleáris biztonsági követelmények szerint a radioaktív szennyező anyagok a lehető legkisebb térrészbe legyenek zárva, minimalizálva ez által a védőpajzs tömegét és méretét. A karbantartási igényeknek megfelelő alrendszer elrendezés mellett sor került a nagy hőmérsékletű és nyomású csövek elvezetésének optimalizálására, a thermomechanikai vizsgálatok eredményeinek figyelembevételével. A csőelrendezés átalakításával lehetőség nyílt a csőcsatlakozások elhelyezésének újragondolására, melynek eredményeképpen az AEU két oldalára, csőtípusonkénti csoportosításban kerültek elrendezésre a csövek csatlakozó pontjai. Az új elrendezés fő előnye, hogy a karbantartási műveletek során lehetőség nyílik a szennyezőanyag kibocsátás szerint kritikus csövek együttes védelemmel való ellátására.



4. ábra: Port kamrán belüli alrendszer elrendezés az AEU keretrendszerben

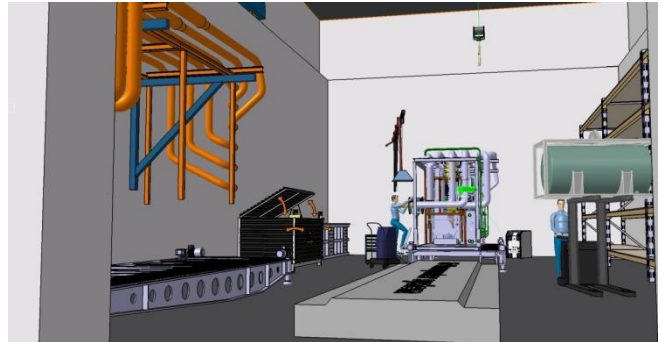
A vázszerkezet optimalizálása és végső kialakításának szilárdsági ellenőrzése végeselem módszerrel került elvégzésre, amelynek eredményei megmutatták, hogy kellő merevségű, de egyidejűleg könnyű szerkezettel ellátott vázkialakítást sikerült létrehozni.

TBM karbantartási műveletek és eszközök fejlesztése

Magyar részvétellel folyt a TBM-ek port kamrában és a melegkamrában működő távkezelő eszközeinek fejlesztése is, melyben a tényleges fejlesztést megelőzte a karbantartandó alkatrészek, továbbá az elvégzendő karbantartási feladatok összegyűjtése.

Sikerült meghatározni azokat a feladatcsoportokat, amelyeket a leállítás során mindenképpen el kell végezni. Ezen kívül beazonosításra kerültek alrendszerenkénti csoportosításban az AEU-n és a TBM-en elvégzendő azon tevékenységek, amelyekre fel kell készülni, de rendszeres elvégzésére előreláthatólag nincs szükség. Az alrendszerek tervezése és az alkatrészek kiválasztása során hosszú élettartamú, kis karbantartási igényű komponensek kerültek kiválasztásra, melyre a limitált karbantartási idő miatt van nagy szükség. Kidolgozásra kerültek továbbá a karbantartási folyamatok a tevékenységek elvégzésének sorrendbe állításával, melyek a helyszükséglet, a sugárzási-szennyezési fokozat és időigényesség szerinti kategorizálása és súlyozása segítségével történt. A melegkamrában elvégzendő karbantartási

folyamatok optimalizálását és a megfelelő elrendezés megtervezését 3D-s modellező program segítségével sikerült elvégezni. A végrehajtandó műveletek közül a legkritikusabbnak a tríciumot tartalmazó szaporító anyag cseréjét jelölték meg.



5. ábra: Melegkamra karbantartási folyamatok szimulációja

A karbantartó szerszámok fejlesztésének megkezdése előtt megvizsgálták a kereskedelmi forgalomban fellelhető eszközök alkalmasságát, majd a fejlesztés azokra a területekre koncentrált, ahol egyáltalán nem vagy csak részben alkalmas megoldást sikerült találni. A fejlesztés során számos koncepció készült a trícium- és héliumszállító csövek vágását, hegesztését végző berendezésekre. Nagyon fontos szempont volt a környezetbe juttatott káros anyagok mennyiségének minimalizálása a műveletek elvégzése során. Az alrendszerek mozgatását és tárolását elősegítő eszközök fejlesztése során pedig, hogy több funkció, helytakarékos megoldások szülessenek.

TBM kazetta hélium elosztó elemeinek thermohidraulikai vizsgálata

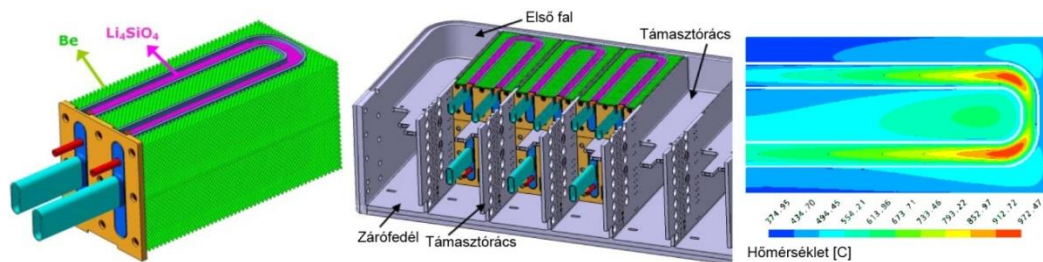
A HCPB TBM szerkezetileg egy tartószerkezetből, trícium szaporító kazettákból (2×8 Breeder Unit), a nagy nyomású héliumgáz elosztását végző szendvics szerkezetű rendszerből (Manifold) áll. Maga a tartószerkezet magába foglalja az első falat (First Wall, FW), az alsó és felső fedeleket (Cap), a belső merevítő szerkezetet (horizontális és vertikális Stiffening Grid) és a berendezést lezáró hátlapot (Backplate). A rendszerben részben a neutron, részben a plazma hőszugárzása miatt jelentős hő keletkezik, melyet hélium gázhűtés távolít el.

A TBM hőterhelés szempontjából legjobban igénybevett eleme az első fal, mely közvetlenül a plazmára néz. Ezen a felületen normál üzemi állapotban 270 kW/m² hőfluxussal lehet számolni, de bizonyos esetekben elérheti az 500 kW/m²-t is, míg a hátsó felületen 60 kW/m² hőterhelés várható a szaporító kazettákból. Az első fal 8 MPa nyomású, 300 °C belépő hőmérsékletű héliummal lesz hűtve. Az aszimmetrikus hőterhelés miatt nagy hőmérsékleti gradiensek várhatóak az acélban, amelyek jelentős hőfeszültségeket okozhatnak.

Az ébredő hőfeszültségek nagyságának meghatározásához szükséges volt az első falban kialakuló hőmérséklet-eloszlás és a hőátadási tényező alakulásának pontos megállapítása a csatorna hossza mentén, melyet a magyar mérnökök komplex thermohidraulikai végeselem szimulációkkal végeztek. Az eredmények azt mutatták, hogy a hőátadási tényező értéke kellően magas és az acél hőmérséklete is alatta marad a kritikus értéknek. A számítások helyességének ellenőrzésére és validációjára elkészült a HETRA kísérlet [4], aminek a

keretében az első fal egy U-alakú hűtőcsatornáját sikerült megvizsgálni. A hűtőcsatorna egyik felületére speciális kerámiahevítvők voltak felerősítve, amelyek képesek előállítani a szükséges 270 kW/m^2 hőfluxust a mérőszaka-

szon. Az így mért hőmérsékletek már összehasonlíthatóak voltak a szimulációk eredményeivel. A végleges konklúzió, hogy az első fal kialakítása megfelelő, az előirányzott hélium tömegárammal jól hűthető.



6. ábra: HCPB TBM szaporító kazettájának szimulációja [5]

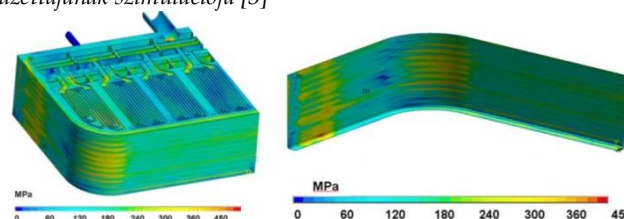
A TBM többi szerkezeti elemét is részletesen megvizsgálták a mérnökök. A zárófedelek (CAP), a horizontális és vertikális támastórácsok (SG), a szaporító kazetták (BU) és a hélium elosztó rendszer (Manifolds) vizsgálata során különböző hűtőcsatorna kialakításokat elemezték termohidraulikai szempontból. A vizsgálatok során javaslatokat tettek a hűtőcsatornák bizonyos szakaszainak megváltoztatására, melyekkel a hidraulikai ellenállás és a pangó térrészek hányada csökkent. A legmegfelelőbb változat kiválasztásánál szem előtt kellett tartani, hogy az minél egyszerűbben legyártható legyen, mégis a megfelelő hűtés biztosított lehessen.

TBM kazetta szerkezeti thermomechanikai vizsgálata

A TBM doboz geometriai optimalizációja az egyes komponensek külön-külön vizsgálatával zajlott. Szükség volt egy olyan globális modell megalkotására is, amely választ tud adni a doboz thermomechanikai viselkedésének részleteire, és ez által elvégezhető annak ellenőrzése a szabványos nukleáris kódok segítségével (SDC-IC). A modellalkotás során a magyar mérnökök fő célja az volt, hogy több különböző terhelési esetet szimuláljanak mind állandósult, mind tranziens (időtől függő) állapotban és a kapott eredmények alapján tegyenek javaslatot olyan geometriai, esetleg konstrukciós változtatásokra, amelyek az ellenőrzéshez használt kódokban (SDC-IC) megfogalmazottnak eleget tesznek.

Az ITER-től érkező igényeknek eleget téve tranziens terhelési eseteket is megvizsgáltak a mérnökök arra vonatkozólag, hogy milyen a TBM doboz thermomechanikai viselkedése egy tipikus ITER plazma égési ciklus esetén, illetve mekkora hatása lehet egy plazma instabilitásnak elsősorban az első falra vonatkozólag. Az eredmények azt mutatták, hogy az egyes komponensek időállandója között jelentős különbség adódik. Ez a különbség a doboz nagy hő tehetetlenségének tudható be. A plazma instabilitás hatását vizsgálva kiderült, hogy annak rövid időtartama miatt csak a TBM doboz első falában tud jelentősebb hőmérsékletnövekedést előidézni, a többi komponensre termikus szempontból nincs hatással.

Fontos szempont volt a termikus számítások ismeretében, a TBM doboz integritásának és szerkezeti merevségi viszonyainak ellenőrzése a megjelenő termikus és elsődleges (belső nyomásból származó) feszültségek ellenében számos terhelési esetben. Ezt az ellenőrzést a feszültségkomponensekre bontás módszerével végezték a mérnökök, mely tipikus nyomástartó edények mechanikai vizsgálatánál és ellenőrzésénél.



7. ábra: Feszültségeloszlás a TBM dobozban és az első falban [6]

Megvizsgálva az adódott eredmények okait, javaslatokat tettek a TBM doboz optimálisabb geometriai és konstrukciós kialakítására, megnövelve a horizontális merevítő rácsok vastagságát, megváltoztatva átömlő furatok elrendezését, az első fal hajlítási sugarát.

A TBM-ben kialakuló neutronter meghatározásra alkalmas eljárások

A HCPB TBM-ben kialakuló neutronter monitorozására alkalmas eljárások fejlesztésének keretében a magyar mérnökök először részletes számításokat végeztek a Monte Carlo neutron-transzport (MCNP) kód segítségével a TBM-ben kialakuló neutronter és a reakciósebességek meghatározására poloidális és sugár irányban. Megvizsgálásra került a TBM egyes szegmenseiben a tríciumtermelés és a szerkezeti elemek aktiválódása. A kapott eredmények alapján becsléssel igazolni lehetett, hogy Be, mint neutronsokszorozó anyag segítségével egy fúziós reaktor önfenntartó tríciumtermelése megvalósítható.

A TBM-ben jellemző körülmények között a neutronter monitorozására elsősorban a passzív módszerek lehetnek alkalmasak, így a különböző aktivációs módszerek kerültek megvizsgálásra. A mérnökök kifejlesztettek egy módszert arra, hogy hogyan lehet kiválogatni előre meghatározott számú detektoranyagot, hogy fólia aktivációs analízis segítségével a lehető „legjobb” spektrum-rekonstrukciót lehessen elérni. A módszer képes nagyszámú detektoranyag közül, azok hatáskeresztmetszetei, besugárzási, hűtési és mérési paramétereit alapján kiválogatni a legmegfelelőbb összeállítást.

Kidolgoztak és kísérletileg igazoltak továbbá a mérnökök egy új mérési eljárást a tríciumtermelés mérésére [7]. Az eljárás a másodlagos töltött részecske aktiváción (MTRA) alapszik, melyben a neutron-besugárzás hatására töltött részecskék keletkeznek, majd ezek újabb, másodlagos aktivációt képesek kiváltani egy úgynevezett indikátor elem, ami ideális esetben gammasugárzó, vagyis aktivitása félvezető gamma detektorral mérhető.

Irodalomjegyzék

- [1] L. M. Giancarli et al., *Overview of the ITER TBM Program*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 87, 2012 Augusztus, 395-402. oldal
- [2] O. Bede et al., *Test Blanket Module maintenance operations between Port Plug and Ancillary Equipment Unit in ITER*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 83, 2008 December, 1865-1869. oldal
- [3] T. Ilkei et al., *European Test Blanket Ancillary Equipment Unit Development*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 86, 2011 Október, 2121-2124. oldal
- [4] M. Ilic et al., *HETRA experiment for investigation of heat removal from the First Wall of Helium-Cooled-Pebble-Bed Test Blanket Module*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 86, 2011 Október, 2250-2253. oldal
- [5] F. Hernandez et al., *Fluid dynamic and thermal analyses of the HCPB TBM Breeder Units*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 86, 2011 Október, 2278-2281. oldal
- [6] F. Cismondi et al., *HCPB TBM thermo mechanical design: Assessment with respect codes and standards and DEMO relevancy*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 86, 2011 Október, 2228-2232. oldal
- [7] I. Rovni et al., *A proposed method for foil set qualification for multiple foil activation measurements in the TBMs*, *Fusion Engineering and Design*, Volume 86, 2011 Október, 2330-2333. oldal