

# Fúziós erőmű komponenseinek szilárdsági méretezése és termomechanikai szimulációja

Szabó Viktor, Porempovics Gábor, Kecskés Szabolcs, Dr. Kovács Ádám

BME Műszaki Mechanikai Tanszék  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., +36 1 463 1369

Jelen cikk a BME Műszaki Mechanikai Tanszék magfúziós kutatásokban való részvételének néhány eredményét mutatja be. A Magyar Euratom Fúziós Szövetség tagjaként lehetőségünk nyílt vezető külföldi magfúziós kutatóintézetek projektjeiben részt venni mind tervezési, mind elemzési munkákban. A Karlsruhe-i Kutatóintézet (FZK) közösen terveztük a HELOKA (Helium Loop Karlsruhe) vákuumtartályt, mely – komplexitása és a benne üzemelő grafit hőszugárzó miatt – többféle szilárdságtani és hőtani végelemes analízist igényelt. Ugyancsak részt vettünk az ITER teszt-köpenyelemének, a HCPB-TBM (Helium Cooled Pebble Bed Test Blanket Module) termomechanikai ellenőrzésében, illetve a greifswaldi W7-X sztellarátor videó diagnosztikai rendszerének tervezésében és hőszugárzós számításában.

## HELOKA projekt

### A projekt rövid ismertetése

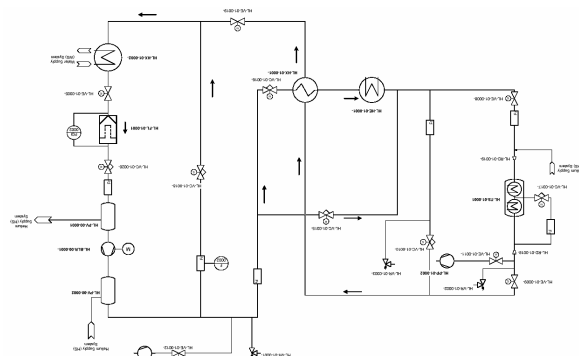
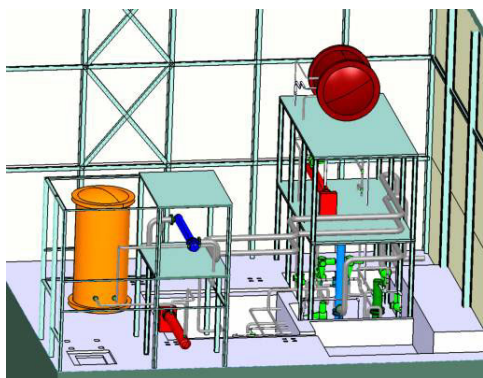
A HELOKA projekt (Helium Loop Karlsruhe), az ITER-ben használandó egyik köpenyelem modul (Test Blanket Modul, TBM) hélium hűtési körének tesztelésére szolgáló berendezés, amit a Karlsruhe-i Kutatóintézetben (FZK, Németország) építenek.

A HELOKA kísérleti berendezés számos tartályt, hőcserélőket, a hélium keringtetésére szolgáló berendezéseket, saját vízhűtési rendszert, vákuum rendszert, nagy teljesítményű elektromos fűtést és diagnosztikai eszközöket tartalmaz. A TBM teszteléséhez használandó

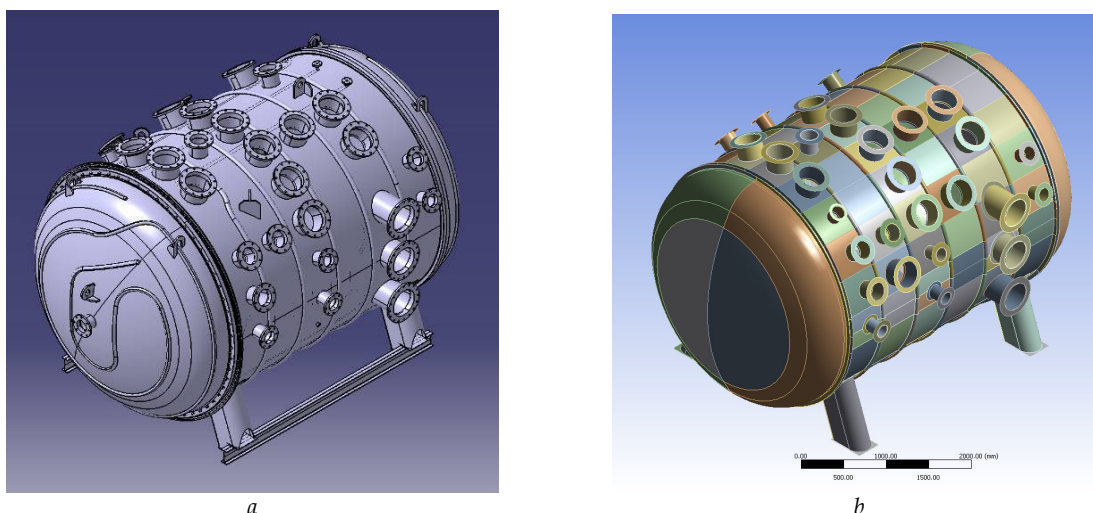
vákuumtartály (1. ábra, piros tartály) konstrukciós munkáit, szabvány szerinti méretezési számításait, valamint a szükséges szerkezetanalízis- és termikus vizsgálatokat a Műszaki Mechanikai Tanszéken végeztük.

### A vákuumtartály

A HELOKA kísérlet során a 3 tonnás TBM-et grafit hőszugárzóval melegítik. A tartály sok csőcsatlakozással rendelkezik, melyek az elektromos rendszerhez, a hélium és vízhűtési rendszerhez, a diagnosztikai rendszerekhez, illetve a biztonsági rendszerekhez csatlakoznak. A tartály belső átmérője 3 m, hossza 5,5 m, falvastagsága 8 mm, üres tömege kb. 6,2 tonna.



1. ábra: A HELOKA berendezés egy korai elrendezési terve és P&ID diagrammja



2. ábra: A vákuumtartály CAD modellje (a) és a hálózásra előkészített felületmodell (b)

A tartály geometriai/konstrukciós tervezését az ITER projektben általánosan használt Catia tervezői rendszerben végeztük, kihasználva a modern parametrikus tervezőrendszer adta rugalmasságot (2a. ábra). A tartály fő elemeit (hengerpalást, tartályfenék) az EN 13445-3 szabvány előírásai szerint méreteztük belső nyomásra, illetve horpadásra. A tartály csőcsatlakozásainak elrendezése nem szokásos, így a csonkok méretezésekor nem tudunk a szabvány előírásai szerint számolni. A szabvány ajánlása alapján kiválasztott szerkezeti kialakítást a végelemes módszer segítségével ellenőriztük.

A szerkezetanalízishez használt középfelület modell szintén a Catia rendszerben készült, majd IGES formátumban importáltuk az ANSYS Workbench DesignModeler moduljába, ahol a hálózáshoz szükséges geometriai módosításokat, felületdarabolásokat végeztük el (2b. ábra).

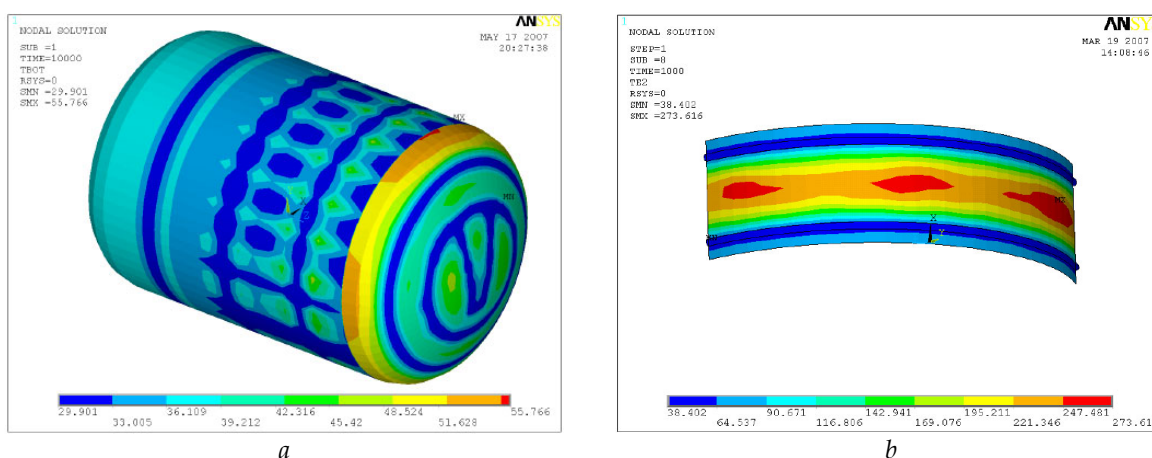
### A HELOKA vákuumtartály hőtani számításai

A TBM tesztelésére előírt  $300 \text{ kW/m}^2$  hőfluxus előállítását egy grafitszálakból álló hőszugárzó rendszer végzi, melynek felületi hőmérséklete akár a  $2000 \text{ °C}$ -ot is elérheti. Ezt a

rendszert – a TBM első falát is beleértve – egy vízhűtéses, illetve passzív hőpajzsokból álló burok veszi körül. A tervezésnél számolni kellett a hőpajzs esetleges tökéletlenségeivel, és meg kellett vizsgálni, hogy kisebb rések jelenléte a hőpajzson hogyan befolyásolhatja a vákuumtartály falának hőmérsékletét. Ennek a követelményekben maximált hőmérséklete  $60 \text{ °C}$ . A rendszer nagy teljesítménye miatt fontos volt a hatásfok optimalítása is, mely esetünkben a TBM által elnyelt és a hőszugárzó által leadott hőteljesítmény hányadosa.

### A vákuumtartály ellenőrzése hőszugárzásra

A vákuumtartály ellenőrzése kétféle módszerrel történt. Az első egy egyszerűsített modell, melynél egy  $2 \text{ mm}$  széles izzó csík szimulálja a rést a pajzson, melyen át a hőszugárzás történik. Többféle emissziós tényezővel és csíkhőmérséklettel teszteltük a rendszert. A  $2000 \text{ °C}$  hőmérsékletű,  $0,7$  emissziós tényezőjű csík esetén kapott hőmérsékleteket mutatja a 3b. ábra. Az eredmény alapján azt állapítottuk meg, hogy sűrűbb hűtőcsatornákra van szükség.



3. ábra: A vákuumtartály falának hőmérséklet eloszlása a teljes tartály külső peremén (a) és a veszélyes övezetben (b)

A javított tervek ellenőrzésénél a teljes vákuumtartály modelljét teszteltük. Itt már megfelelő lett a fal hőmérséklete. Biztonsági tartalékot jelent továbbá, hogy konzervatív megközelítéssel a tartály külső felületén elhanyagoltuk a konvektív hőátadást, mely jelentős hűtést fog jelenteni a későbbiekben.

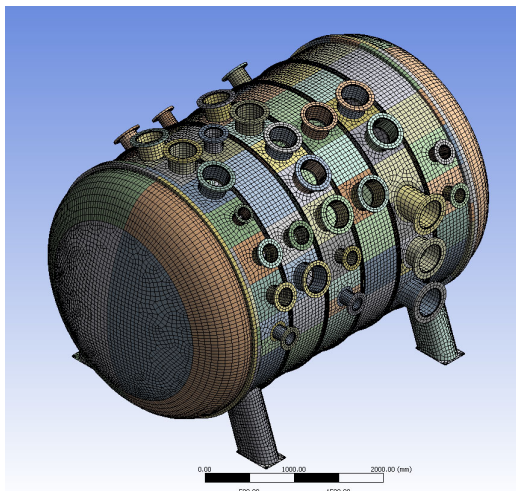
**A rendszer hatásfokának javítása**

A rendszer hatásfokát mind analitikusan, mind végeelem modellek segítségével vizsgáltuk. A modellekben passzív molibdén hőpajzsok használatával jelentős hatásfoknövelést (32 % volt az eredeti, 52% az új hatásfok) sikerült elérni. Ez jelen esetben nagyjából 400 kW teljesítmény megtakarítást eredményez az eredeti koncepcióhoz képest a hőszugárzás

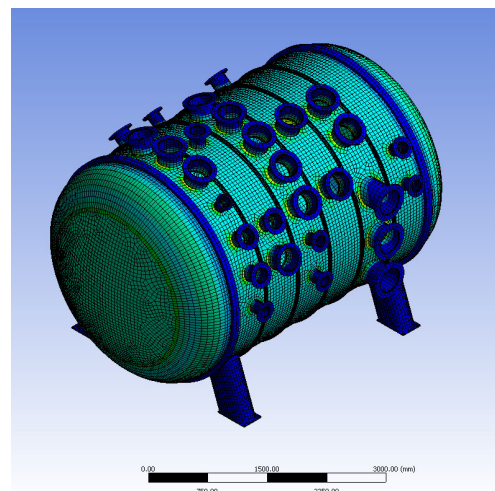
blokkolásával, illetve a grafit hőszugárzó által kilökött szénrészecskék felfogásával. A hővesztesség csökkenése lehetővé teszi kisebb tápegység használatát, illetve több napos vagy hetes kísérleteknél jelentős költségcsökkentést is jelent.

**A HELOKA tartály végeelemes ellenőrzése**

A vákuumtartályt ellenőriztük 5 bar belső nyomásra, vákuumterhelésre, horpadásra, emelésre és a belső szerkezetek súlyterhelésére. Az ellenőrzéshez használt végeelem modell látható a 4a. ábrán, a számított egyenértékű feszültség eloszlás pedig vákuumterhelés esetén a 4b. ábrán. A feszültség szintek minden esetben kellő biztonsággal alatta maradnak a megengedett értékeknek.

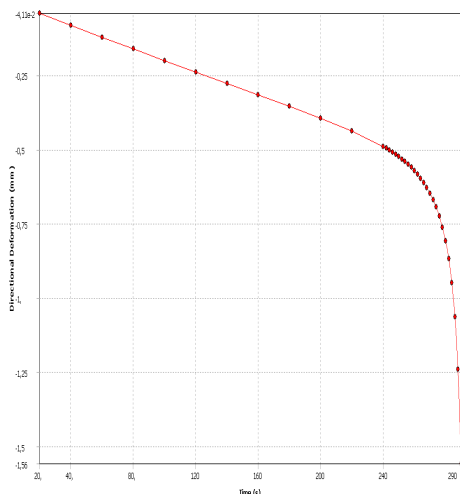


a

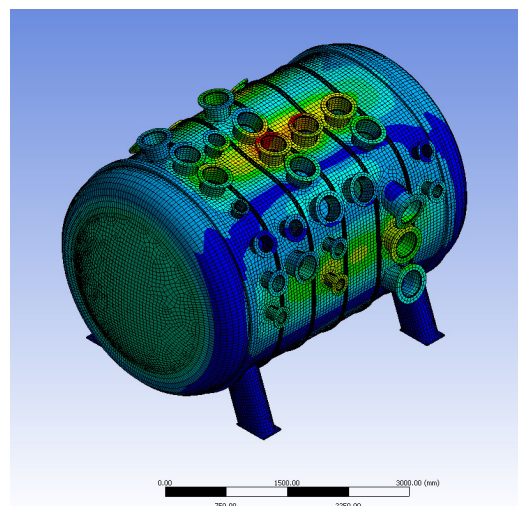


b

4. ábra: A vákuumtartály végeelem hálója (a) és a feszültségeloszlás vákuumterhelés esetén (b)



a



b

5. ábra: A tartály egy pontjának elmozdulása (a); A horpadt alak – nemlineáris horpadás (b)

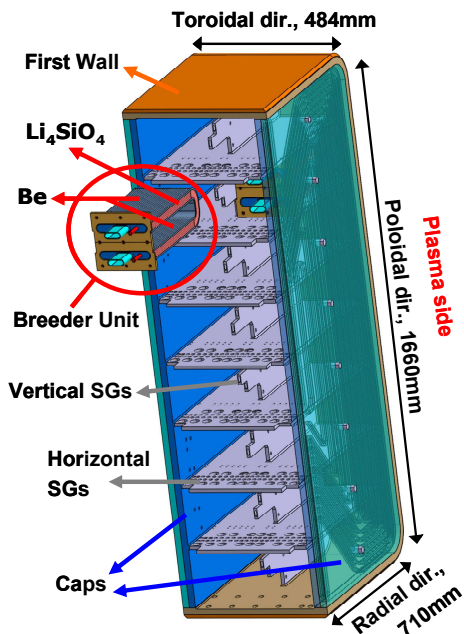
A vákuumtartály horpadásvizsgálatát két lépcsőben végeztük. Első közelítésben egy lineáris vizsgálatot végeztünk, és az így kapott terhelési tényezőt használtuk a nem lineáris vizsgálat futási paramétereinek meghatározására (5a-b. ábra). Lineáris horpadásvizsgálat esetén az elfogadható terhelési tényező szokásosan a 4-es. Ez azt jelenti, hogy a számítások szerint a stabilitásvesztés (horpadás) az üzemi terhelés négyszeresénél következne be. A lineáris vizsgálat eredménye körülbelül 5-ös terhelési tényező lett, a nem lineáris horpadásvizsgálat eredménye 4,6-os terhelési tényező. A két érték alapján kijelenthető, hogy a tartály konstrukciója horpadás szempontjából is megfelelő.

## A HCPB TBM

A HCPB TBM (Helium Cooled Pebble Bed) berendezést az FZK-ban tervezik. Befoglaló méretei a következők: magasság 484 mm, szélesség 1660 mm, mélység 710 mm. Szerkezeti anyaga csökkentett aktivitású EUROFER acél.

A TBM szerkezeti egy tartószerkezetből (ún. HCPB box), trícium szaporító kazettákból (Breeder Unit), a nagynyomású (80 bar) héliumgáz elosztását végző szendvics szerkezetű rendszerből (Manifold - MF) áll (6. és 7. ábra).

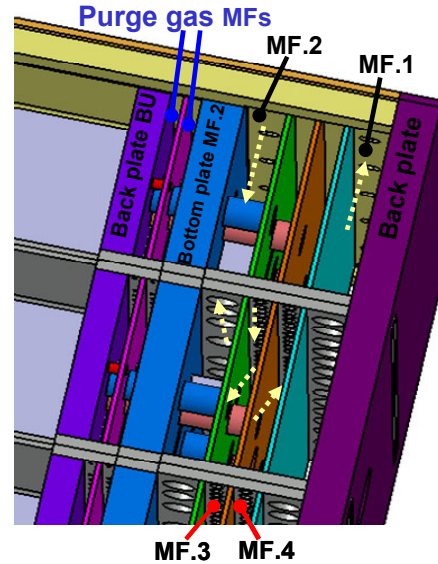
A HCPB box az első falból (First Wall - FW), az alsó és felső fedelekből (Cap), a belső merevítő szerkezetekből (Horizontál and Vertical Stiffening Grid - SG), és a szerkezetet lezáró hátlapból (Backplate) áll (6. ábra).



6. ábra: Függőleges HCPB TBM

A hélium az MF.1-en keresztül lép be a szerkezetbe 300 °C-os hőmérséklettel, 80 bar nyomáson, majd végighalad az első falon, ahonnan az MF.2-be ömlik. Ebből a térrészből az 1,3 kg/s tömegáramú hűtőközeg egy részét elvezetik egy bypass vezetéken keresztül, a többi pedig eloszlik a belső

merevítők és a fedelek között, majd az MF.3-ban ismét eloszlik a szaporító kazettákba, végül az MF.4-ben ismét összegyűlve egy gyűjtővezetéken keresztül távozik a rendszerből (7. ábra) [1].



7. ábra: Manifold rendszer HCPB TBM

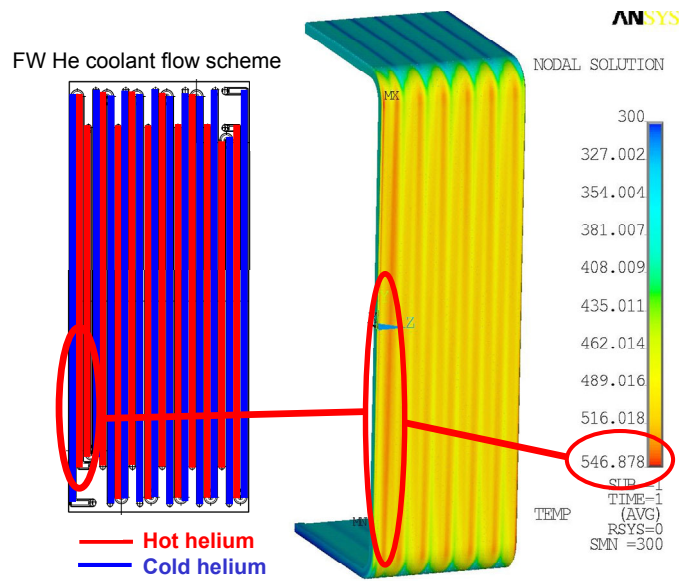
## A HCPB TBM termomechanikai szimulációja

A korábban említett fontos alkatrészek termikus ellenőrzése is az ANSYS végelem szoftverrel készült. Eddig az alkotmányokat csak egymástól külön vizsgáltuk, ezen felül még nem álltak rendelkezésre a függőleges TBM-n végrehajtott neutron számítások eredményei. Ezért a korábban a vízszintes elrendezésen kapott eredményekből extrapolációval származtatott termikus peremfeltételek szerepelnek a modellekben.

### Az első fal termomechanikai szimulációja

Az első fal jelenlegi koncepciója 12 darab egymástól független hűtőcsatornát tartalmaz. Konzervatív tervezési kritériumokat alkalmazva a plazmából származó hőfluxus 500 kW/m<sup>2</sup> volt, illetve a neutron becsapódásokból származó hőfejlődést egy radiális irányban csökkenő exponenciális függvény írja le. Az FW falán konvekcióval a hűtőközegnek átadódó hő számítását 1D-s fluid elemekkel oldottuk meg. A hélium és a hűtőcsatornák fala közti konvekciós tényezők értékei korábbi CFD számítások eredményeiből származnak.

Több végelem modell is készült, melyekkel rámutattunk arra, hogy a csatornák közti távolságot megfelelően (20 mm) megválasztva az EUROFER acél megengedett maximális hőmérséklete (550 °C) alatt lehet tartani az első fal maximális hőmérsékletét, konzervatív hőterheléseket figyelembe véve. A TBM első falának hőmérséklet-eloszlásán látható (8. ábra), hogy a csatornák elrendezéséből adódóan két „forró” csatorna egymás mellett egy lokálisan magas hőmérsékletű zónát eredményez, ahol a hőmérsékletek a tervezési kritériumban megszabott maximális érték közelében alakulnak [1],[2].

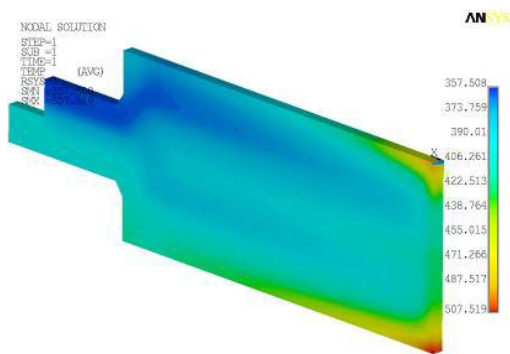


8. ábra: A TBM első falának (First Wall) hőmérséklet-eloszlása

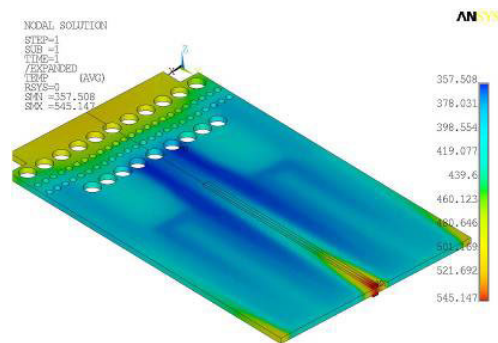
**Függőleges és vízszintes merevítők termomechanikai szimulációja**

A függőleges és vízszintes merevítők bár nincsenek közvetlen kapcsolatban a plazmával, a szaporító kazetákból mégis nagy hőterhelés éri őket a közvetlen érintkezés miatt [3]. Az eredmények azt mutatták, hogy a kialakuló maximális hőmérsékletek a megengedhető tervezési határ (550 °C) alatt maradtak mindkét esetben. Függőleges esetben 505 °C, vízszintes esetben 545 °C a maximális kialakult hőmérséklet (ld. 9-10. ábra).

becsülni tudjuk az egyes szubkomponensekből kilépő hélium hőmérsékletét. Ennek a modellnek a fejlesztése jelenleg is folyamatban van (lásd 11. ábra).



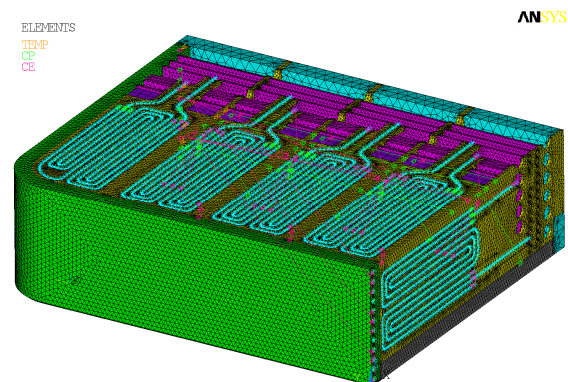
9. ábra: Hőmérséklet eloszlás a függőleges merevítőben (stiffening grid)



10. ábra: Hőmérséklet eloszlás a vízszintes merevítőben (stiffening grid)

**A negyed HCPB TBM összetett termomechanikai modell**

Egy komplexebb modellt felépítve vizsgálni tudjuk a HCPB TBM komponenseinek egymásra gyakorolt hatását, így például választ kaphatunk többek közt arra is, hogy a vízszintes SG magas hőmérsékletű zónáját mennyire tudja hűteni a hegesztési vállnál a függőleges SG széle, vagy

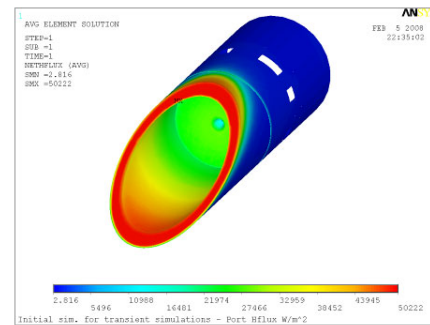


11. ábra: A HCPB TBM összetett mechanikai modellje

## A Wendelstein-7X sztellarátor videó-diagnosztikai komponense

A Wendelstein-7X sztellarátor Greifswaldban épül. Fajtájának messze legnagyobbja lesz 13 méteres átmérőjével. Tanszékünk aktív résztvevője volt a videó-diagnosztikai rendszer fejlesztésének, melynek során tervezési és szimulációs feladatokat végeztünk el. A sztellarátort az építése során jelentkező nehézségek (bizonyos elemek hűtésének átmeneti hiánya) miatt a jelenlegi terv szerint csak csökkentett, impulzus üzemben fogják eleinte használni. Szükségessé vált a berendezés hősugárzásra való ellenőrzése, melyet egy tranziens szimulációval végeztünk el. Itt először egy hősugárzásos modellel számoltunk (ld. 12. ábra), majd ezzel végeztünk tranziens szimulációt. A

szimuláció eredménye: 30 ciklus után sem éri el a szerkezet legmelegebb pontjának hőmérséklete a 300 °C-ot.



12. ábra: Hőfluxusok a szerkezet felületén

## Irodalomjegyzék

- [1] F. Cisondi, J. Rey, A. von der Weth, Sz. Kecskés, H. Neuberger, M. Ilic, O. Bitz, L.V. Boccaccini, T. Ihli: Design update and mock-up test strategy for the validation of the EU HCPB TBM concept. Research report, FZK Karlsruhe 2008.
- [2] Sz. Kecskés: Thermal simulation of FW in the new vertical arrangement of HCPB TBM. Research report, FZK Karlsruhe 2008.
- [3] Sz. Kecskés: Thermal simulation of horizontal and vertical SG in the new vertical arrangement of HCPB TBM. Research report, FZK Karlsruhe 2008.