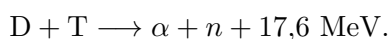


Magfúziós erőmű szimulációja

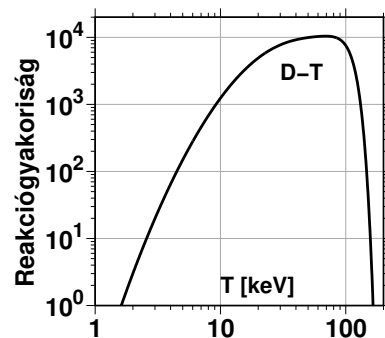
A szimulációs feladat során az üzemi korlátok figyelembe vételével megpróbáljuk megtalálni egy tokamak típusú magfúziós erőmű legnagyobb villamos teljesítményű konfigurációját.

A jelenleg fejlesztés alatt álló, szabályozott magfúziót megvalósító reaktorokban a hidrogén két nehéz izotópját, a ^2H deutériumot (D) és ^3H tríciumot (T) használják üzemanyagként. Amennyiben az üzemanyag hőmérséklete, sűrűsége, és úgynevezett „összetartása” a megfelelő tartományban van, úgy nagy számban létrejöhet az alábbi fúziós reakció:



A fúziós teljesítmény arányos azzal, hogy potenciálisan hány D mag reagálhat hány T maggal. A fúziós folyamatok viselkedését darabszám helyett jobban jellemzi az $n = N/V$ térfogati sűrűség, mértékegysége darab per köbméter (m^{-3}). A teljes fúziós teljesítmény tehát arányos ($\propto$) a sűrűség négyzetével:

$$P_F \propto n^2 \cdot R(T).$$



Az $R(T)$ reakciógyakoriság a hőmérsékletnek nem monoton függvénye (lásd ábra), maximumát 70 keV körül éri el, ezután meredeken csökken a fúziós reakciók valószínűsége. Számottevő fúzióra csak akkor számíthatunk, ha az üzemanyag hőmérséklete eléri a 10 – 20 keV, azaz 100 – 200 millió Kelvin nagyságrendjét. Ekkora hőmérsékleteken már minden anyag úgynevezett plazma halmazállapotba kerül. Ebben az állapotban az elektronok leszakadnak az atomtörzsekről, és azoktól függetlenül mozognak.

A reakció során az energia 80%-át a keletkező neutron viszi el. Ez, mivel elektromosan semleges részecske, nem nagyon hat kölcsön a plazmát alkotó elektronokkal és atommagokkal, ezért lényeges energiavesztés nélkül kilép a plazmából, és elnyelődik a hűtőköpenyben. A keletkező α -részecske, ami az energia 20%-át viszi el, viszont elektromosan töltött. Ez folyamatos Coulomb-kölcsönhatásokon keresztül energiája nagy részét leadja a plazmának, és ezáltal segít fűteni és fenntartani a fúziós plazmát. De a reaktornak szüksége van külső fűtésre (P_K): egyrészt az üzemi hőmérséklet eléréséhez, másrészt a plazma irányításához, harmadrészt (bizonyos esetekben) a jobb teljesítmény eléréséhez.

A folyamatosan energiát termelő, nagy hőmérsékletű, ezáltal folyamatosan tágulni próbáló plazmát valamilyen módon össze kell tartani. A Napban ezt a gravitáció biztosítja. Földi körülmények között az egyik opció a mágneses terek használata. Az egyik erre szolgáló berendezés a tokamak, amiben egy tórusz („fánk”) alakú plazmát tudunk összetartani nagy teljesítményű, szupravezető elektromágneses tekercsekkel. A tokamak plazma összetartásához szükség van egy a plazmában hajtott áramra, aminek mágneses tere összeadódik a külső térrel, létrehozva a mágneses összetartást. A plazmaáram kis mértékű ohmikus fűtést (P_Ω) is biztosít, de ezzel csak pár keV hőmérséklet érhető el: a hőmérséklet növelésével a plazma elektromos ellenállása csökken (!), így az ohmikus fűtés hatásfoka is csökken.

A fúziós reaktorban állandósult állapotban teljesítmény-egyensúly kell legyen, a $0,2 \cdot P_F$ alfa-fűtés és P_K külső fűtésnek éppen ki kell elégítenie a plazmában létrejövő különböző sugárzási- és transzport veszteségeket. A plazma hőmérsékletét adott konfiguráció mellett ez az egyensúly határozza meg. A P_S sugárzási veszteség fő forrása a mágneses erővonalak mentén haladó, a plazma többi részecskéivel folyamatos Coulomb-kölcsönhatásban lévő, és ezek által folyamatosan „gyorsuló” töltött részecskék sugárzása. Ez bonyolult módokon függ a sűrűségtől, hőmérséklettől, mágneses tértől, geometriától, stb. Általánosságban elmondható, hogy a sugárzási veszteségek a mágneses tér, sűrűség és hőmérséklet növelésével erősen nőnek.

A transzport veszteségek fő hajtóereje a plazmában lévő nagy sűrűség- és hőmérsékleti inhomogenitás („belül sűrű és forró, kívül ritka és hideg”) miatt létrejövő turbulencia, ami szintén bonyolult módon függ a plazma és erőmű paramétereitől. A plazma termikus energiatartalmának (W), és a veszteségi teljesítmény P_T hányadának aránya az úgynevezett összetartási idő ($\tau = W/P_T$) – annál hatékonyabb

a reaktor, minél magasabb τ . Általánosságban elmondható, hogy a plazmaáram, mágneses tér, illetve a sűrűség növelésével az összetartási idő kis mértékben nő. Ellenben a plazmában elnyelt alfa- és külső fűtési teljesítmény növelése csökkenti az összetartási időt.

Egyensúlyban, állandó teljesítményen, az összes plazmában elnyelt fűtési teljesítmény egyensúlyban van az összes veszteségi teljesítménnyel:

$$0,2 \cdot P_F + P_\Omega + P_K = P_S + P_T.$$

A reaktor azon a legmagasabb T hőmérsékleten üzemel, ahol ez a stabil teljesítmény-egyensúly fennáll. A feladat során az erőmű által megtermelt elektromos áramot szeretnénk maximalizálni. A villamos teljesítmény számításához figyelembe kell venni, hogy a hőtjeljesítmény árammá alakításának, illetve az áram plazma fűtéssé alakításának is van egy-egy határfoka: előbbi 35%-nak vesszük, utóbbit az egyszerűség kedvéért $1/3$ -adnak, így P_K fűtéshez $P_K/(1/3) = 3P_K$ villamos teljesítményt kell betáplálni, ennnyivel kevesebbet termel az erőmű. Levonódik még az ohmikus áramhajtás- és fűtés fenntartásához szükséges teljesítmény (P_Ω). Továbbá az erőműnek van egy fix 70 MW villamos fogyasztása is: a keringető szivattyúk, a szupravezető mágneseket hűtő rendszerek, stb. üzemeltetése. Így a végső villamos teljesítmény

$$P_E = 0,35 \cdot (P_F + P_\Omega + P_K) - 3 \cdot P_K - P_\Omega - 70 \text{ MW}.$$

Üzemeltetési határok

Bár a tokamak az egyik „legegyszerűbb” plazmaösszetartási technológia, a benne lévő plazmaáram jelenléte több problémával jár, emiatt az elérhető üzemi paraméterek korlátosak.

Áramhatár Ahhoz, hogy a plazmaösszetartás stabil egyensúlyban maradjon, az I_p plazmaáram és a B mágneses tér aránya nem lehet több egy határértéknél. Ennek átlépésekor a plazmaösszetartás milliszekundum időskálán összeomlik, amit plazma diszrupciónak hívnak. A szimulációs programot úgy írtuk meg, hogy a plazmaáramot mindig az adott mágneses térnél elérhető lehető legnagyobb, még éppen biztonságos értéken tartsa. Ezzel a limittel tehát nem kell foglalkoznunk. Ugyanakkor ez az oka annak, hogy a mágneses tér változtatásával a plazmaáram is változni fog.

Sűrűséghatár Tokamakokban, szintén a plazmaáram jelenléte miatt, a plazma n sűrűsége nem lehet több egy bizonyos határértéknél. Ezt átlépve ugyancsak diszrupció következik be. Ez ellentétben áll azzal a céllal, hogy a fúziós teljesítmény annál nagyobb, minél nagyobb a sűrűség. A sűrűséghatár tapasztalati összefüggés, pontos elméleti magyarázata jelenleg is kutatás tárgya. Egyik feladatunk lesz meghatározni, hogy az elérhető legnagyobb sűrűség hogyan függ a bemeneti paraméterektől (P külső fűtés, B mágneses tér).

Nyomáshatár Elméleti számításokkal, illetve tapasztalati úton azt találták, hogy amennyiben a nyomás átlép egy kritikus értéket, úgy a plazmában szintén diszrupció lép fel. Ez ellentétben áll azzal a szemponttal, hogy magas hőmérsékletű, és magas sűrűségű plazmára van szükségünk a nagy számú fúziós reakciókhoz. Az elérhető legnagyobb nyomás arányos a mágneses tér és plazmaáram szorzatával:

$$[p_\alpha + n \cdot k \cdot T]_{\max} \propto B \cdot I,$$

ahol p_α a nagy energiás (még nem termikus) α -részecskék nyomása. A mágneses tér általunk választott bemenet, míg a plazmaáramot a program automatikusan állítja a fenti áramhatár figyelembe vételével. A szimuláció kezelőfelülete jelzi, hogy adott paraméterek mellett a nyomáshatár hány %-ánál járunk. 100% jelenti a diszrupciót, ekkor a szimuláció leáll, és a paraméterek állítása után újra kell indítani.

Mérési feladatok

A [x] szögletes zárójelben feltüntetett számok az egyes részfeladatokra maximálisan adható részpontokat mutatják *tájékoztató jelleggel*. A versenybizottság a beérkezett megoldások fényében (pl. ha van olyan részfeladat, amire nem érkezett jó megoldás) ettől kis mértékben eltérő pontozást is alkalmazhat.

1) [0] Gondosan olvassuk végig a teljes mérésleírást!

A) Gondoljuk át a feladatot! ($\Sigma 5$)

- 2) [2] Gondoljuk át, és írjuk le, hogy a mérésleírásban szereplő információk alapján milyen előnyei és hátrányai lehetnek a mágneses tér, sűrűség, és külső fűtés növelésének!
- 3) [2] Mire számítunk, a sűrűséghatárhoz illetve a nyomáshatárhoz közel, vagy attól távol lesz-e a legjobb a villamos teljesítmény? Miért?
- 4) [1] Ismerkedjünk meg a program kezelésével! Nézzük meg hogyan működnek a bemenetet állító kezelőszervek, és hogy milyen adatokat ír ki a kezelőfelület. Írjuk le, hogy ezekből melyikre lesz mindenképpen szükség a feladatok végrehajtásához!

B) Üzemi határok ($\Sigma 10$)

- 5) [6] Legalább 2 különböző fűtési teljesítmény és 3 mágneses tér mellett határozzuk meg a sűrűséghatárt és a plazmaáramot. Ábrázoljuk mindkettőt (külön-külön) a mágneses tér függvényében! Ha a sűrűséghatár helyett a nyomáshatárba sikerül belefutni, úgy próbálkozhatunk pl. másik $(B, n_{\max})$ kombinációval, vagy a fűtési teljesítmény csökkentésével. Milyen más kimeneti értéke(ke)t lehet érdemes már most rögzíteni?
- 6) [4] Hogyan függ a sűrűséghatár és a plazmaáram a külső fűtéstől és a mágneses tértől? Írjuk le mit tapasztalunk, és hogy hogyan segíthetnek a kapott eredmények az optimalizációban!

C) Optimalizáció ($\Sigma 10$)

- 7) [7] A korábbi tapasztalatainkat is felhasználva próbáljuk megkeresni, melyik kombinációban érhető el a legjobb villamos teljesítmény. Jegyezzük le a tapasztalatokat, a gondolatmenetet. A munka mögötti logika és annak dokumentációja több pontot ér, mint maga a maximum megtalálása!
- 8) [3] Készítsünk jegyzőkönyvet a tapasztalatainkról! Pontok járnak a jegyzőkönyv általános érthetőségére, követhetőségére.

Használati utasítás A bemeneti értékeket a csúszkák húzásával, a nyilakkal, és az értékek közvetlen beírásával is állíthatjuk. A szövegdozok csak számokat fogadnak el bemenetként. A program oldalt visszajelzést ad a plazma és az erőmű főbb paramétereiről. Diszrupció esetén a hibaüzenetet jóvá kell hagyni, és a szimulációt a bemeneti paraméterek állítása után újraindítani.

Tanácsok

- a) Ha a szimuláció diszrupcióba fut bele, figyeljük meg, hogy melyik határt értük el.
- b) Nem szükséges (p_α nélkül nem is lehet) kiszámítani a nyomáshatár értékét. A T hőmérsékletet nem tudjuk közvetlenül állítani. Ami hasznos, ha megértjük, hogyan függ B -től és P -től.
- c) A legjobb villamos teljesítmény nem egyenlő a legmagasabb pontszámmal!
- d) A pontokat alapvetően a munka dokumentációja és a gondolatmenet határozza meg. Próbálgatás helyett törekedjünk a logikus munkára, és írjuk le a gondolatmenetünket: mit miért csináltunk.
- e) A jegyzőkönyv beadható papíron, elektronikusan, és vegyesen is. Minden fájl nevében legyen benne egyértelműen a kódunk, illetve a papír jegyzőkönyvben egyértelműen utaljunk a fájlokra.

(Megjegyzés: a szimulációt valódi tokamak fizikára, és létező erőművi tervekre alapoztuk. Azonban az egyszerűbb végrehajtás érdekében bizonyos komplex fizikai effektusokat és technikai korlátokat szándékosan nem modellezünk, ezért az eredmények nem mindenhol tükrözik a valóságban várható értékeket.)