



ITER

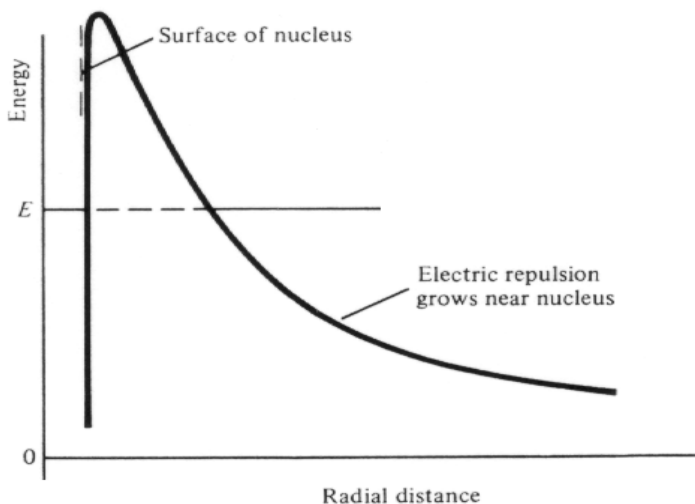
International Thermonuclear
Experimental Reactor

ITER

- Uvod - “dobivanje enegije”
- Fizikalni pricipi
- Tehnička izvedba
- Ciljevi
- Povijest, Sadašnjost, Budućnost
- Za i protiv
- Reference

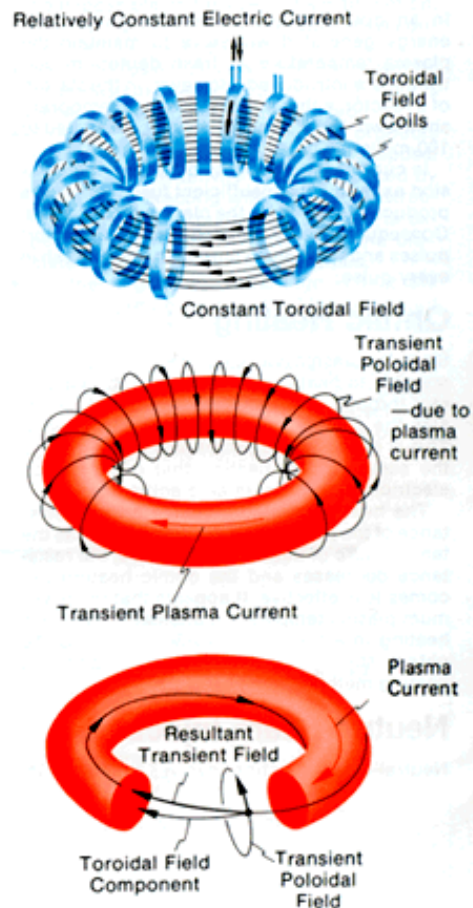
Uvod

- Energija dobivena fuzijom: $D + T \rightarrow He + n + 17.6 \text{ MeV}$
- Čestice moraju tunelirati kroz barijeru
- Energija čestica \approx
 - 10 milijuna K (na Suncu)
 - 100 milijuna K (na Iteru)
- Suncu se nikuda ne žuri, nama da
- 235 puta više energije nego pri fisiji ekvivalentne mase Urana
- Pitanje: U kakvoj posudi držati tako vruće čestice (Wolfram se tali na 3500 C)



Fizikalni principi

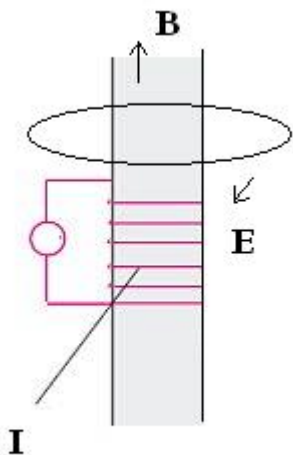
- Što je to ITER? ITER je veliki ToKaMaK
- Što je to Tokamak? – TOroidal CHAamber with MAgnetic Coils



- Torusna zavojnica stvara magnetno polje, unutar nje nalazi se plazma elektrona, deuteronu, tritona...
- po Lorentzu $F = q v B$, okomita komponenta brzine čestice u homogenom magnetskom polju uzrokuje kruženje iste, a ne dozvoljava bijeg iz torusa – zarobili smo česticu
- kružno magnetsko polje oko struje “stisnulo” bi nosioce naboja i uzrokovalo povećanje gustoće – veći broj sudara
- to je u najkraćim crtama - ITER

...Fizikalni principi

- Da bi zarobili čestice, trebamo ih ionizirati – **stvoriti plazmu** i **ubrzati** je. Kako?



Po Faradeyu $\text{rot } E = -dB/dt$

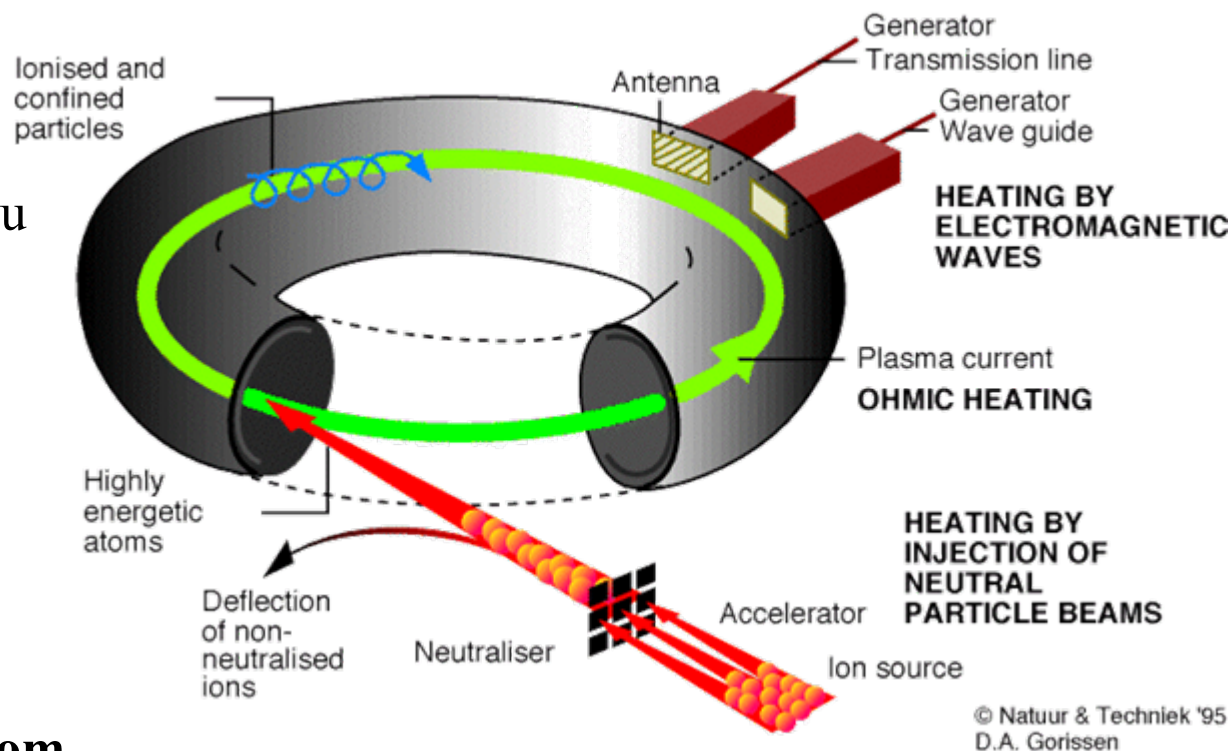
Ako konstantno i polako povećavamo struju I , jačati će i magnetsko polje B , koje će inducirati **virtložno električno polje** E

Potom stavimo torus (tokamak) s atomima deuterija i tricija u to virtložno polje i naglo ioniziramo čestice, nastati će lavinasta ionizacija i dobili smo plazmu koja polako ubrzava do pola maksimalne struje - u ITER-u iznosi 15 MA !!!

Pri tome elektroni i pozitivni ioni kruže u suprotnim smjerovima, i u međusobnim sudarima povećavaju temperaturu. To se zove **OMSKO GRIJANJE** i potpuno je analogno grijanju običnog vodiča – na ovaj se način mogu postići temperature do 10 milijuna Kelvina

...Fizikalni principi

- Daljnje zagrijavanje postiže se “bombardiranjem” plazme **visokonenergetskim neutralnim snopom** koji se trenutno ionizira i deponira dio energije u plazmu
- ioni i elektroni se u magnetnom polju gibaju frekvencijama $\omega = qB/m$
- izmjenično EM polje tih frekvencija unosi dodatnu energiju tzv, **ion i elektron ciklotron rezonancijom**
- na taj se način postižu željene temperature $\approx 100 \text{ milijuna Kelvina}$



Tehnička izvedba

- Do sada je sve bilo super i sve za pet, ali kako to realizirati?
- U istraživanje i razvoj uloženo je **1 milijardu €**, bez garancije da će se projekt realizirati. S tim budžetom predložena su rješenja za “**7 ključnih dijelova ITER-a**”
 - Vakumska komora (1/7)
 - Testne deke s pripadnim daljinskim upravljanjem (2/7)
 - Divertor s pripadnim daljinskim upravljanjem (2/7)
 - Centralna zavojnica (1/7)
 - Torusne zavojnice (1/7)

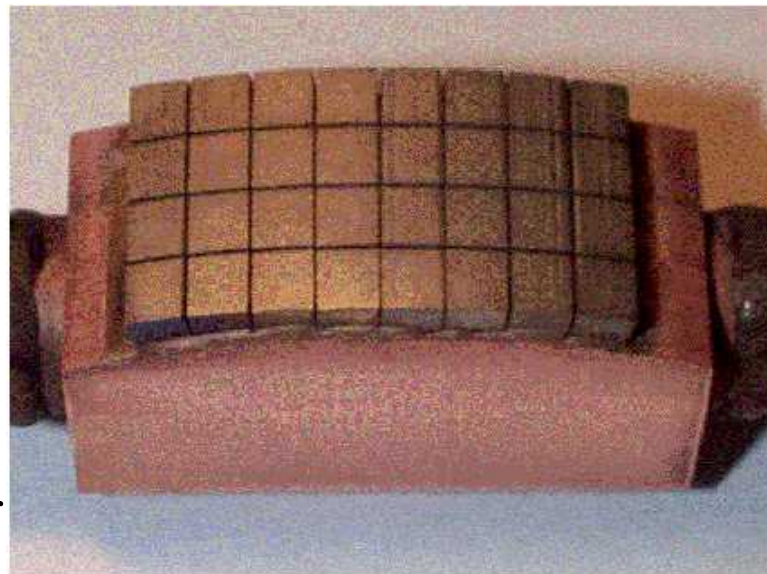
...Tehnička izvedba – Vakuumska komora

- ≈ 35 metara u promjeru
- ≈ 1 metar debeo čelik
- u reakciji $H + H \rightarrow He + n + 17.6 \text{ MeV}$, pri tome neutron odnosi $\approx 14 \text{ MeV}$ -a energije, stvara radiaktivne izotope uništava kristalnu strukturu čelika, zavojnica...
- treba biti otporna na udarce fotona, γ zraka, α čestica...
- hladi se sa vanjske strane
- istodobno treba biti **jeftin** za proizvodnju



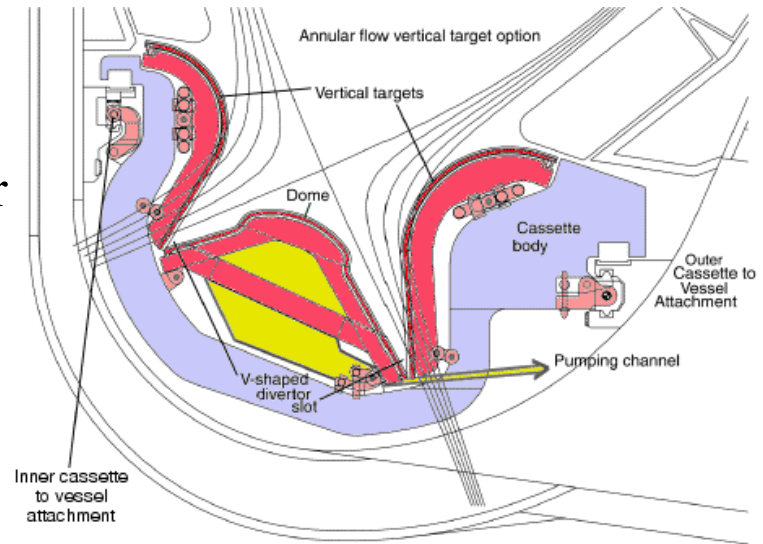
...Tehnička izvedba – testne deke

- nalaze se s unutrašnje strane vakuumske komore, i služe za apsorpciju nepoželjnih čestica
- sprječavaju daljne štete
- dijelom su od Litija, u reakciji:
$$\text{Li} + \text{n} \rightarrow \text{He} + \text{T}$$
 proizvode tricij potreban za gorenje (u prirodi ga nema jer je vrijeme poluraspada 12.8 god.)
- moraju biti **jeftine**, **efikasne** i **trajne**, lagano se zavarivati i mijenjati
- za mijenjanje deka razvija se i posebni sustav daljinskog upravljanja
- današnji prototipovi izdrže ≈ 1000 ciklusa
- težina ≈ 2000 tona



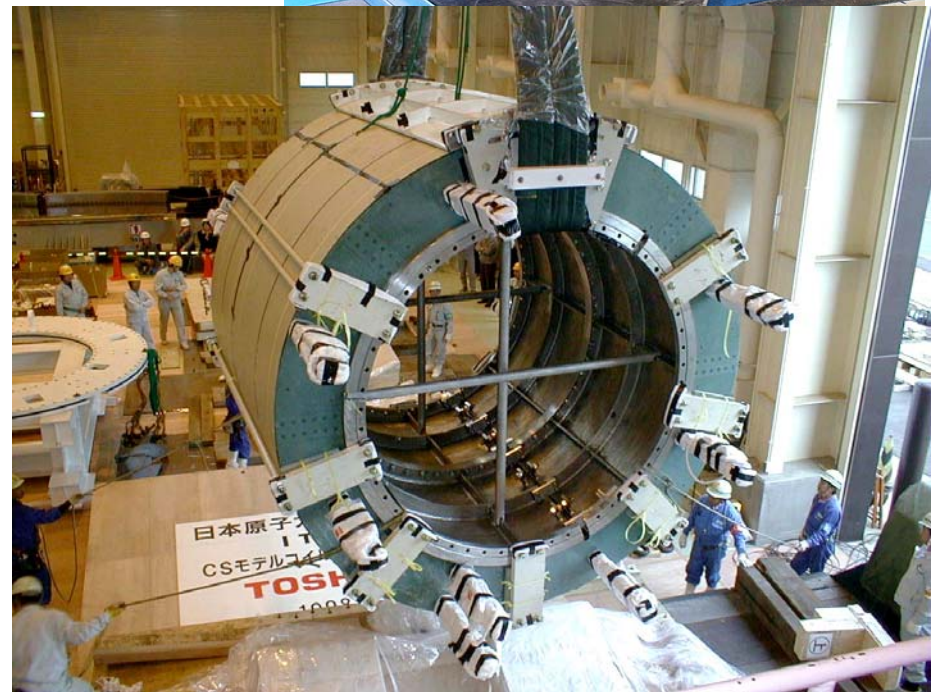
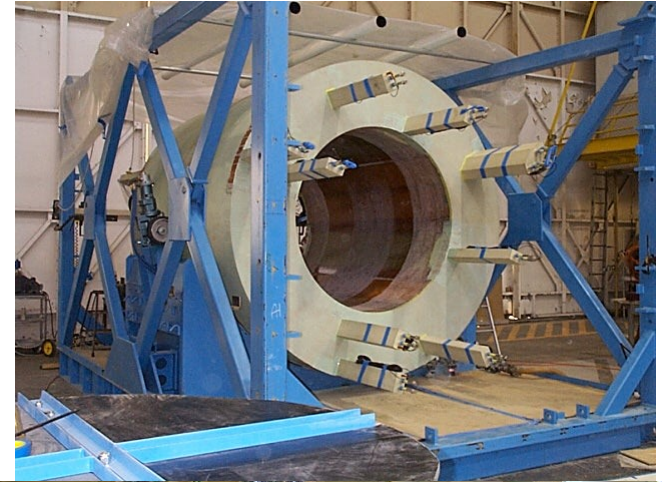
...Tehnička izvedba – Divertor (cassete)

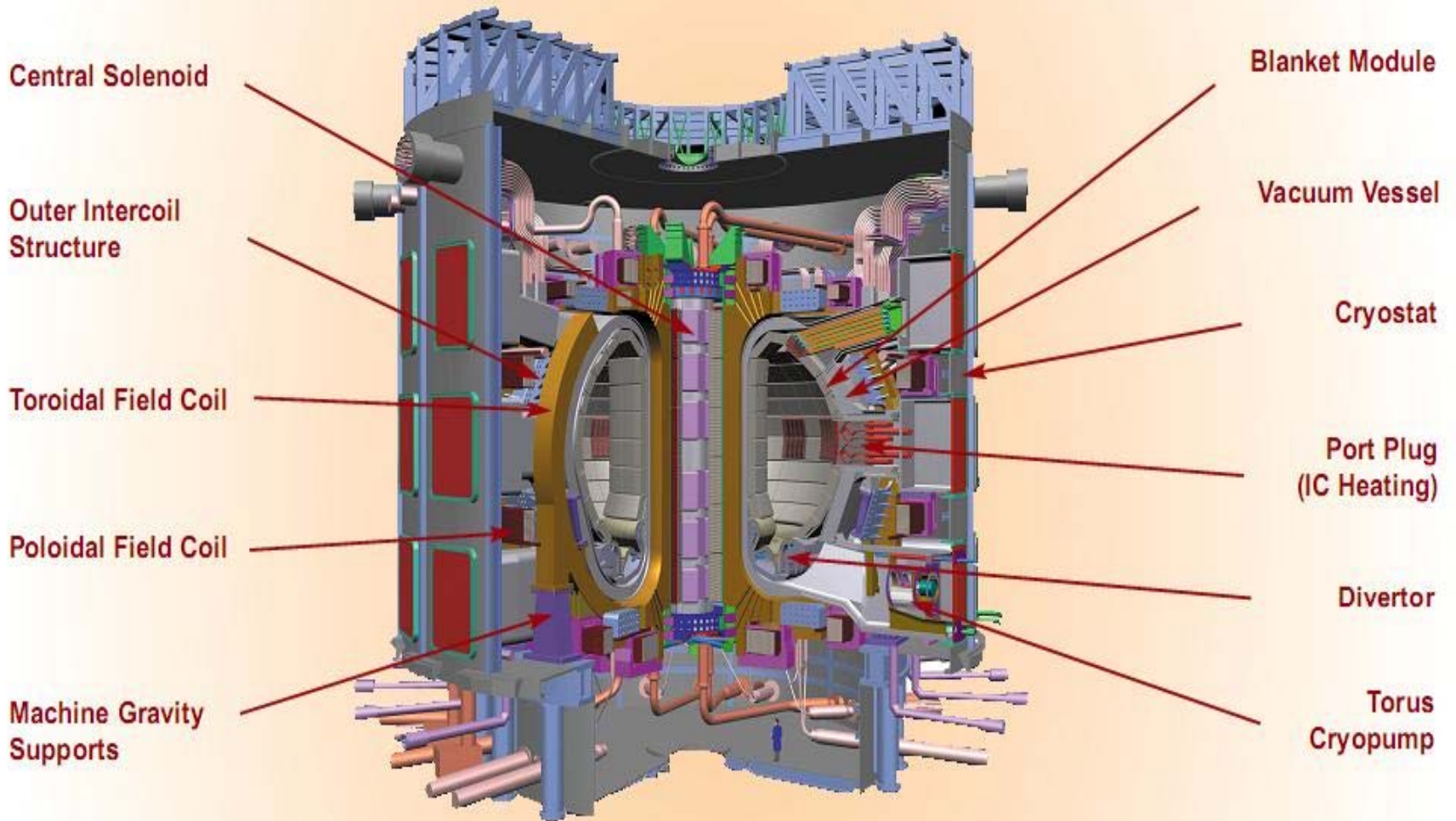
- nalaze se na dnu vakuumske komore
- jedine u “kontaku” sa plazmom,
- služe za izdvajanje Helija iz plazme jer on više ne doprinosi dobivanju enegije
- sloj wolframa i ugljika nalazi se na bakrenoj ploči koju hladi voda
- mora biti **jeftin** i **brzo imjenjiv** (≤ 6 mjeseci)
- za njega je također trebao biti razvijen i poseban sustav daljinskog upravljanja (pri izmjeni)



...Tehnička izvedba - zavojnice

- U centru se nalaze dvije zavojnice
- testirane su strujom 46 kA pri čemu je dobiveno polje 13,5 T
- Hlade se helijem na 4 K, a napravljene su od slitina NbTi i NbSn
- sličnih karakteristika su i torusne zavojnice





...i na kraju, što očekujemo...

- pulsevi 300 - 500 sekundi
- snaga 500 MW
- neće dati ni jedan A korisne struje !
(NE Krško radi na 700 MW bez prestanka, a ne 300 sekundi)

Č e m u o n d a s v e o v o ???

Ciljevi ITER-a

- ❑ pokazati da je moguće postići stabilne pulseve
- ❑ postići da je omjer enegije za održavanje plazme / dobivene energije, Q barem **5** do **10** ili više
- ❑ Dodatno istražiti materijale za nuklearnu fuziju (DEMO a.k.a. “povratak ITERA”)

Prošlost, sadašnjost, budućnost ...

- Iter kao ideja nastao još 1985.
- 2006 potpisan ugovor o gradnji – 7 partnera: EU (4/11) , Japan (2/11), Kina, Sad, Rusija, Republika Koreja, Indija (svaki po 1/11 troškova)
- gradi se na jugu Francuske, sam tokamak planiran 2010./2011. Prva plazma se očekuje 2016.g
- izgradnja \approx 10 godina (5 milijardi €)
- eksploatacija \approx 20 godina (5 milijardi €)
- Trenutno gotovo svi tokamaci u svijetu testiraju nešto za ITER

DEMO – budućnost

- očekivan $Q = 25$
- nacrt 2017, početak izgradnje 2024, kraj 2033
- trebao bi davati 2 GW **korisne energije** na duplo duljem puls (red veličine modernih NE)

ZA

- 100 puta manje radioaktivnog otpada, bez dugoživućih izotopa
- ne može doći do velike katastrofe (Černobil)
- bez stakleničkih plinova

PROTIV

- 700 udruga u Francuskoj protiv “jer ne poznajemo gorenje vodika dovoljno dobro”
- uloženi veliki novac bez jamstava
- moguće bilo bolje ulaganje

Zaključak – mi smo i dalje “naftna generacija”

Literatura

- E.M. Purcell, “*Elektricitet i magnetizam*”, udžbenik Sveučilišta u Berkeleyu, Tehnička knjiga Zagreb, 1988
- J.D.Jackson, “*Classical Electrodynamics*” 3rd Edition
- M. Furić “*Moderne eksperimentalne metode, tehnike i mjerenja u fizici*”, Školska knjiga – Zagreb, 1992
- <http://www.iter.org/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>