

Měření základních parametrů vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

J. Krbec¹

¹České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

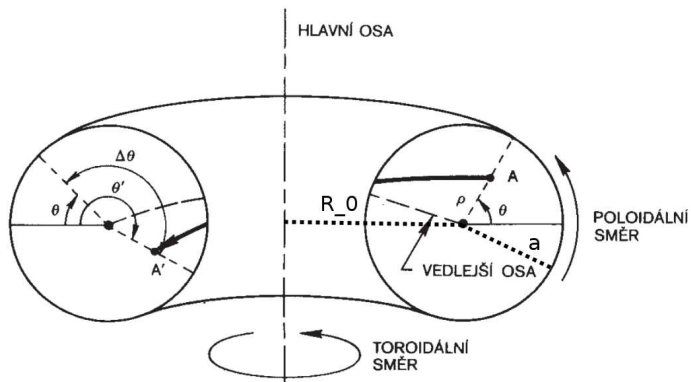
U3V "Fyzika přátelsky / Aplikované přírodní vědy"

Seznam přednášek

- 1. Teorie: *Termojaderná fúze*
- 2. Teorie: *Tokamak + pomocné systémy*
- 3. Teorie: *Diagnostika plazmatu*
- 4. Experiment: *Měření*
- 5. Experiment: *Zpracování naměřených dat*
- 6. Teorie: *Energetická rovnováha plazmatu*
- 7. Experiment: *Výpočet základních parametrů plazmatu + (vytvoření protokolu z měření)*
- 8. Exkurze: *Tokamak COMPASS*

Tokamak

Geometrie tokamaku



R_0 - Major Radius (velký poloměr), a - Minor Radius (malý poloměr)

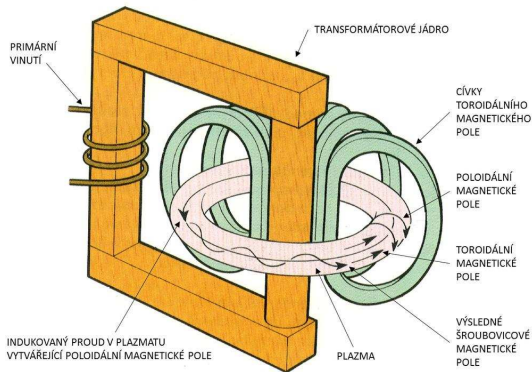
Tokamak

Magnetický indukční tok:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\alpha)$$

Faradayův zákon
elektromagnetické
indukce:

$$U_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

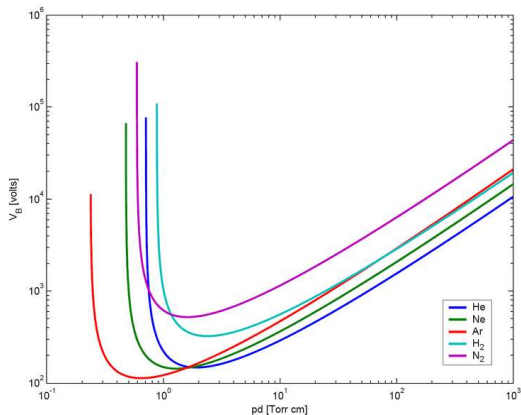


Průraz plazmatu

Vznik primárního
elektronu: kosmické
záření předionizace

Následuje lavinovitá
ionizace

Závislost průrazného
napětí na tlaku popsána
Paschenovým zákonem



Plazma v magnetickém poli

Lorentzova síla

$$F = q(E + v \times B) \quad (1)$$

kde E je intenzita elektrického pole, v rychlost částice a B velikost magnetické indukce.

Larmorův poloměr

Z rovnosti odstředivé a Lorentzovy síly dostaneme pro částici o hmotnosti m a náboji q

$$r = \frac{mv_k}{Bq} \quad (2)$$

kde v_k je rychlost kolmá na magnetické pole B .

Drifty

Driftová rovnice popisuje pohyb gyračního středu kolmo na magnetické pole B

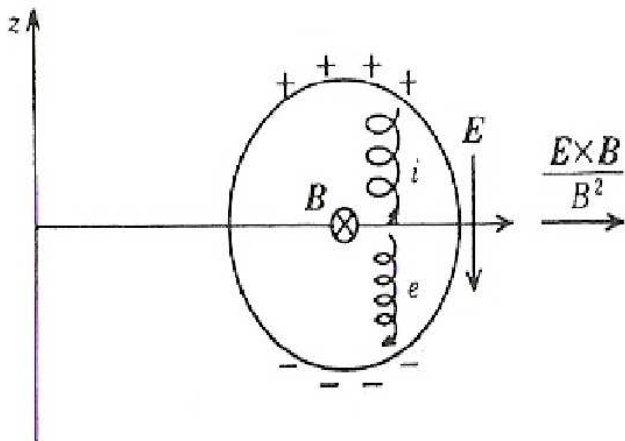
$$v_D = \frac{F_{ext} \times B - \mu B \times \nabla B - m\ddot{R} \times B}{QB^2} \quad (3)$$

kde F_{ext} je síla působící na gyrační střed, \ddot{R} představuje druhou časovou derivaci polohy gyračního středu a $\mu = \frac{mv_k}{2B}$ je magnetický moment.

KULHÁNEK, P., Teorie plazmatu, studijní text pro FJFI ČVUT, 2008,
<http://www.aldebaran.cz/studium/fpla.pdf>

Udržení plazmatu uprostřed nádoby

Drift částic v toroidálním magnetickém poli



Udržení plazmatu uprostřed nádoby

- Jak odstranit drift?

Udržení plazmatu uprostřed nádoby

- Jak odstranit drift?
- Nějakým způsobem propojit spodek a vršek plazmatu aby se potenciály mohly průběžně vyrovnávat

Udržení plazmatu uprostřed nádoby

- Jak odstranit drift?
- Nějakým způsobem propojit spodek a vršek plazmatu aby se potenciály mohly průběžně vyrovnávat
- Řešení: vytvoření šroubovicovitého magnetického pole

Udržení plazmatu uprostřed nádoby

- Jak odstranit drift?
- Nějakým způsobem propojit spodek a vršek plazmatu aby se potenciály mohly průběžně vyrovnávat
- Řešení: vytvoření šroubovicovitého magnetického pole
- Tokamak: proud plazmatem
- Stellarátor: vytvoření pole pomocí systému vnějších cívek

Udržení plazmatu uprostřed nádoby

Poloidální cívky

Soustava vodičů, kterými procházejí proudy různými směry

Jsou vinuty podél komory v toroidálním směru

Tlak magnetického pole:

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

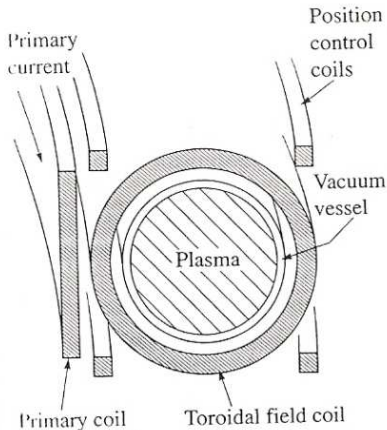
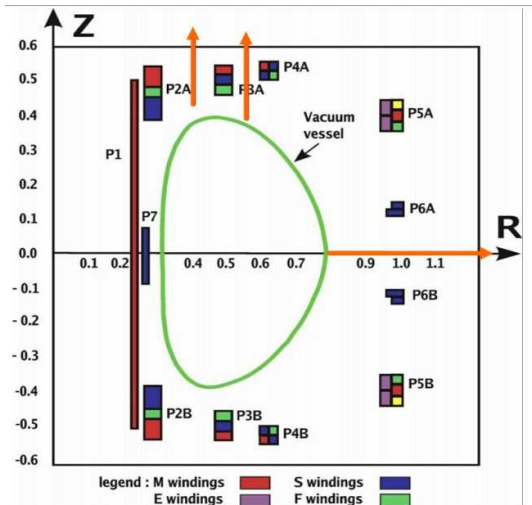
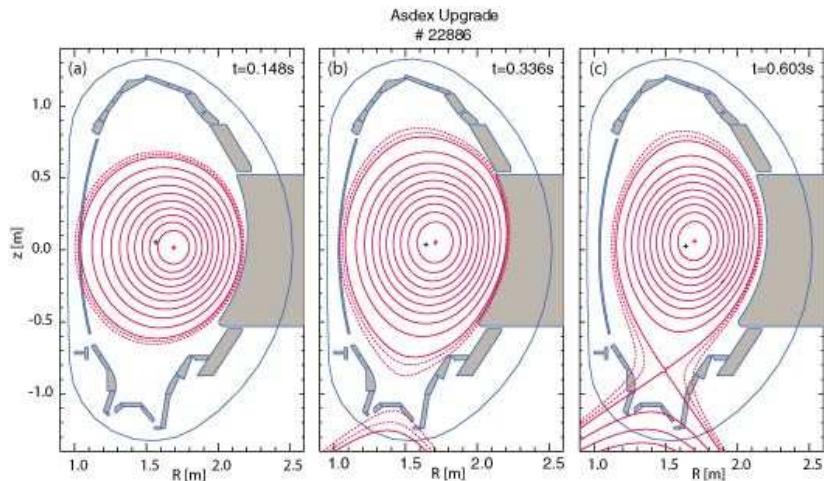


Fig. 1.6.4 Arrangement of coils in a tokamak.

Poloidální cívky - COMPASS

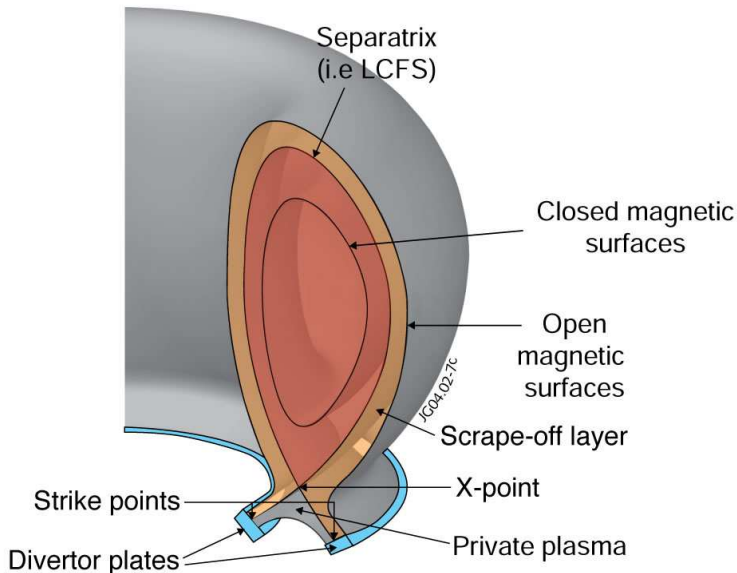


Tvar plazmatu

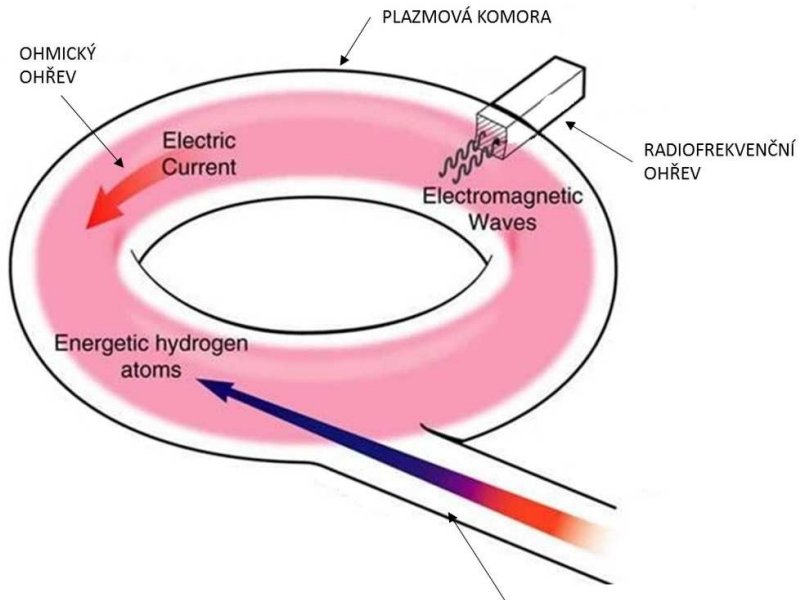


Vlevo: Limiterová konfigurace. Vpravo Divertorová konfigurace

Tvar plazmatu - Divertorová konfigurace



Ohřev plazmatu



Jouleovo teplo

$$Q = Ult \quad [J] \quad (5)$$

Teplo vznikající průchodem proudu vodičem o konečné vodivosti.

Vodivost plazmatu

$$\sigma(T_e) = 1.544 \cdot 10^3 \frac{T_e^{3/2}}{Z_{eff}} \quad [S/m] \quad (6)$$

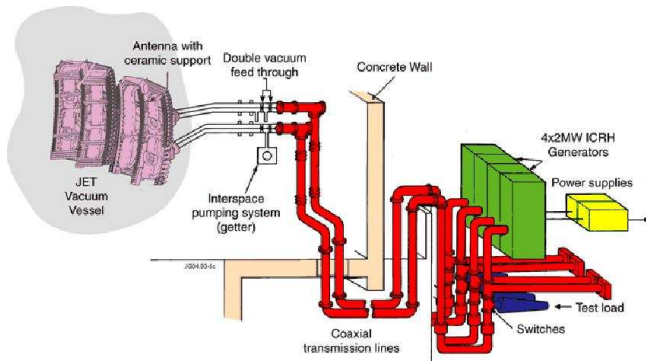
kde T_e je elektronová teplota a Z_{eff} efektivní náboj plazmatu.

Rezonanční frekvence

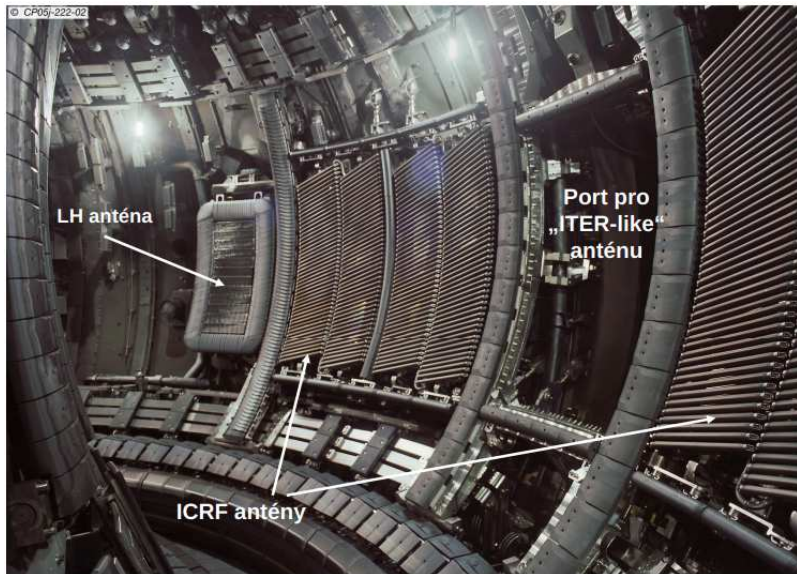
$$\omega = \frac{qB}{m} \quad (7)$$

ECRH - Electron Cyclotron Resonance Heating

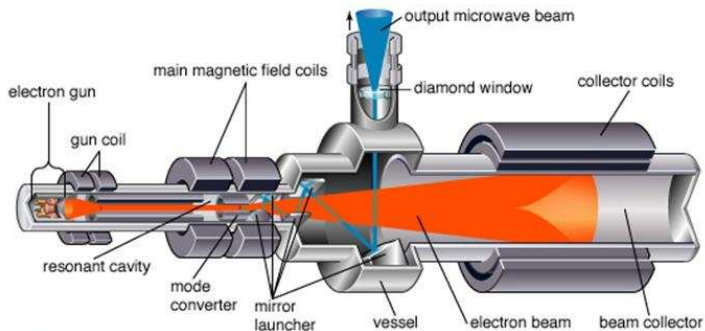
ICRH - Ion Cyclotron Resonance Heating

$\omega_i \approx$ desítky MHz

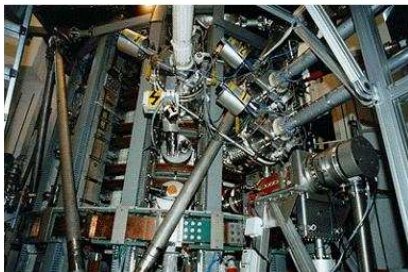
ICRH - Jet



$\omega_e \approx 28B$ GHz, generování pomocí gyrotronu



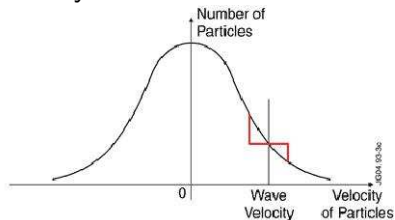
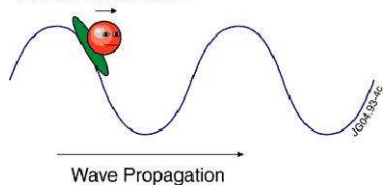
© 2004 Encyclopædia Britannica, Inc.



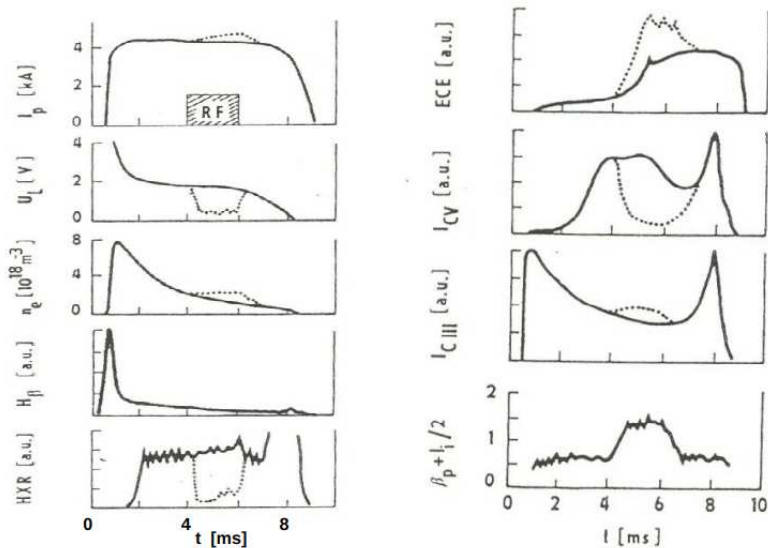
Vlečení proudu plazmatem - LHCD

$\omega_{LHCD} \approx \text{GHz}$, generování pomocí klystronu

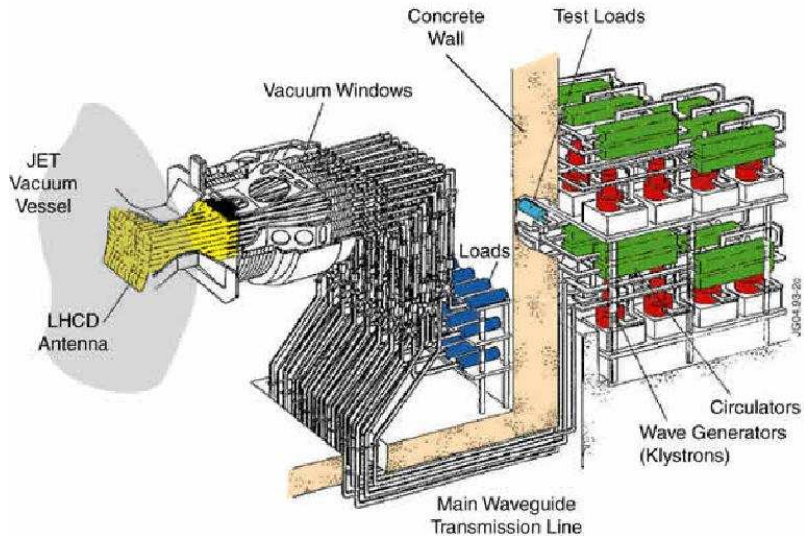
Particle Acceleration



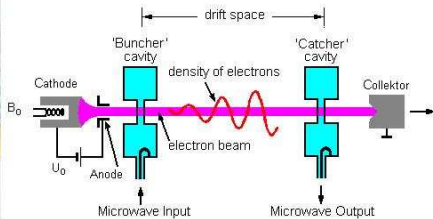
Vlečení proudu plazmatem - LHCD



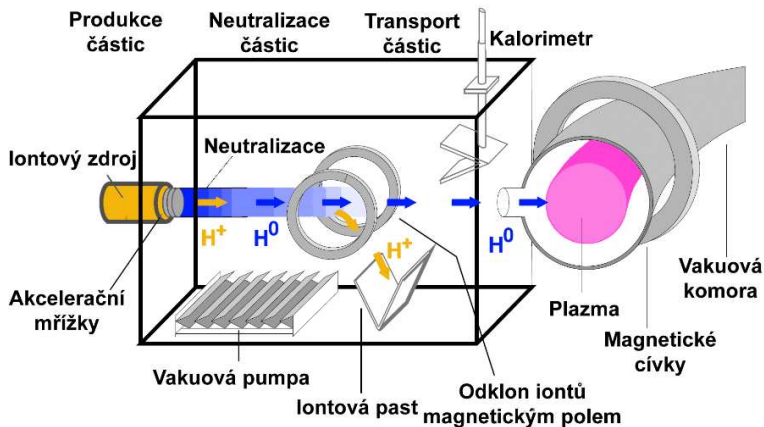
Vlečení proudu plazmatem - LHCD



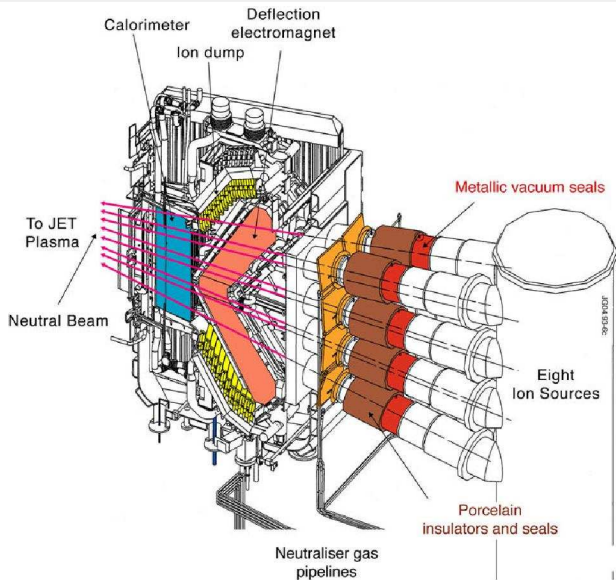
Vlečení proudu plazmatem - LHCD



Ohřev plazmatu - svazkový ohřev



Ohřev plazmatu - svazkový ohřev



Ohřev plazmatu - svazkový ohřev



Zdroje energie - setrvačníky

Např. JET, COMPASS

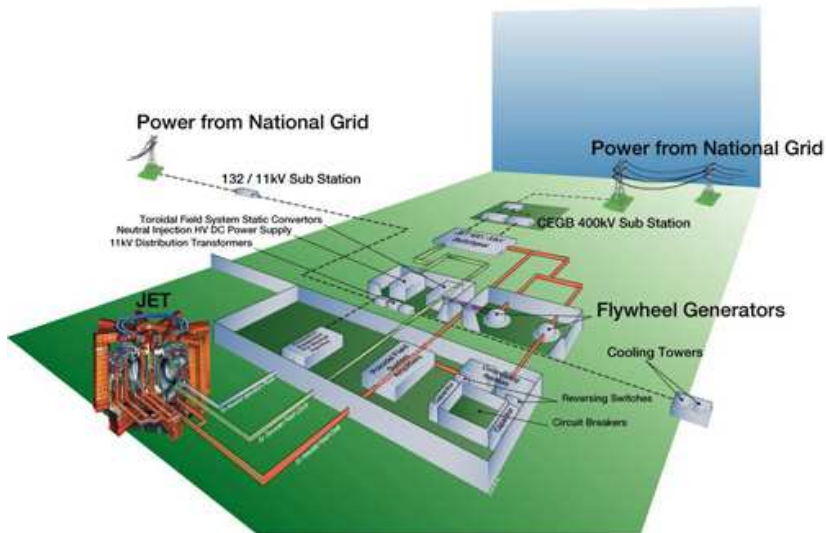


Zdroje energie - ze sítě

Např. MAST, Tore Supra, polovina JET



Zdroje energie - JET

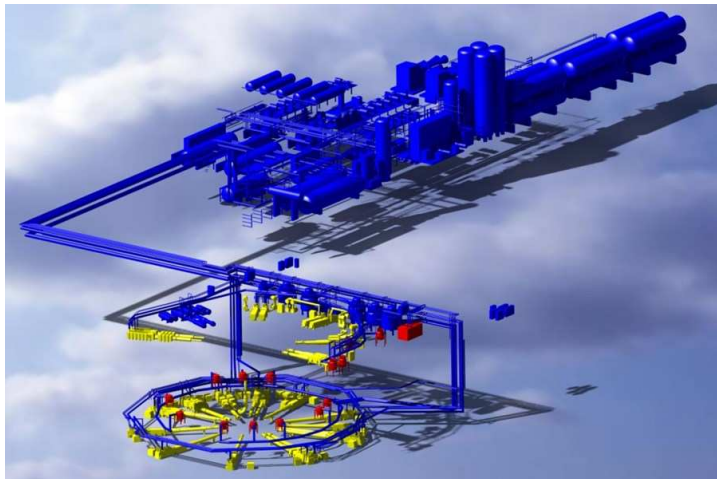


Chlazení

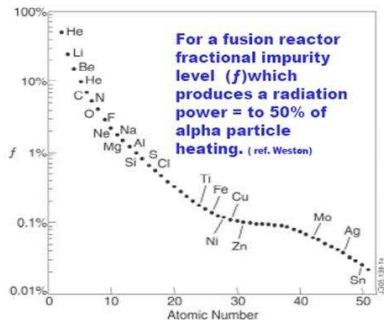


Kryotechnika

System chlazení, zkapalňování a rozvodů tekutých plynů. V praxi se používá dusík a helium.



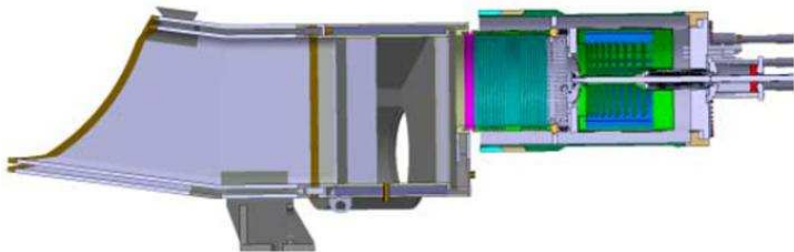
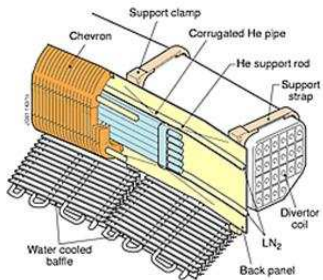
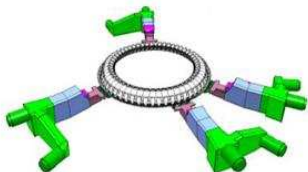
Vakuové čerpání



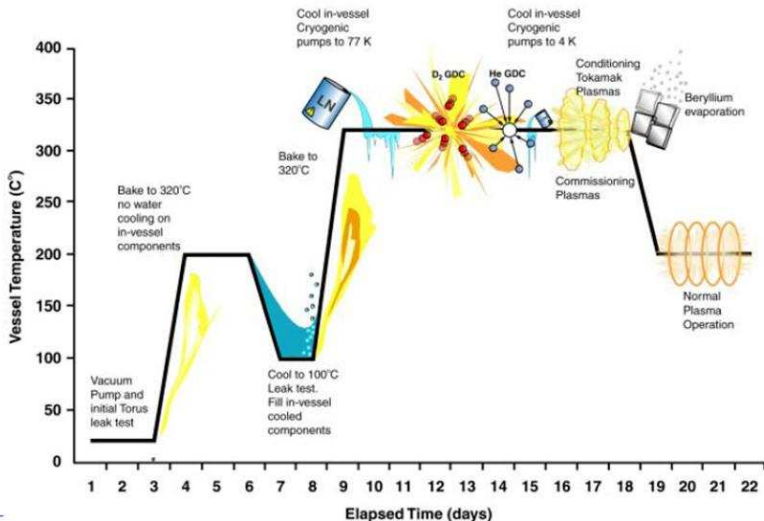
Turbomolekulární vývěvy



Kryovývěvy



Příprava vakuua



Řízení experimentu

