

# Perspektivy využití supravodičů v tokamacích

Michal Shkut

České vysoké učení technické

*Studentská vědecká konference zaměřená FTTF v Mariánské*

25. ledna 2018

- 1 Úvod
- 2 Základní charakteristiky supravodičů
- 3 Vysokoteplotní supravodiče
- 4 ITER
- 5 Aktuální výzkum HTS
- 6 HTS-ST25
- 7 HTS-ST25, ST40
- 8 Moje cíle a plány
- 9 Reference

## Supravodivost - motivace

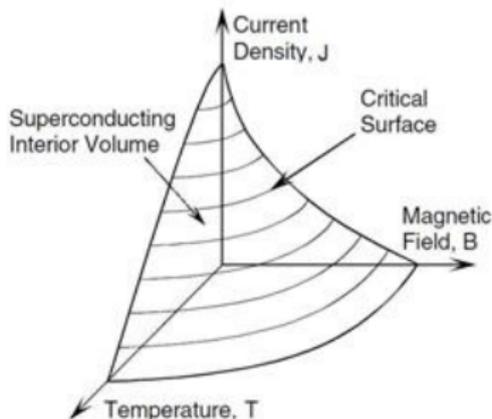
- Poprvé objevena roku 1911 - H. K. Onnes (nobelova cena)
- Široké využití supravodičů v mnoha vědních oborech
- Vysoká důležitost pro fúzi - supravodivé cívky, silnoproudé vodiče
- Vysokoteplotní supravodiče (1986), velký potenciál

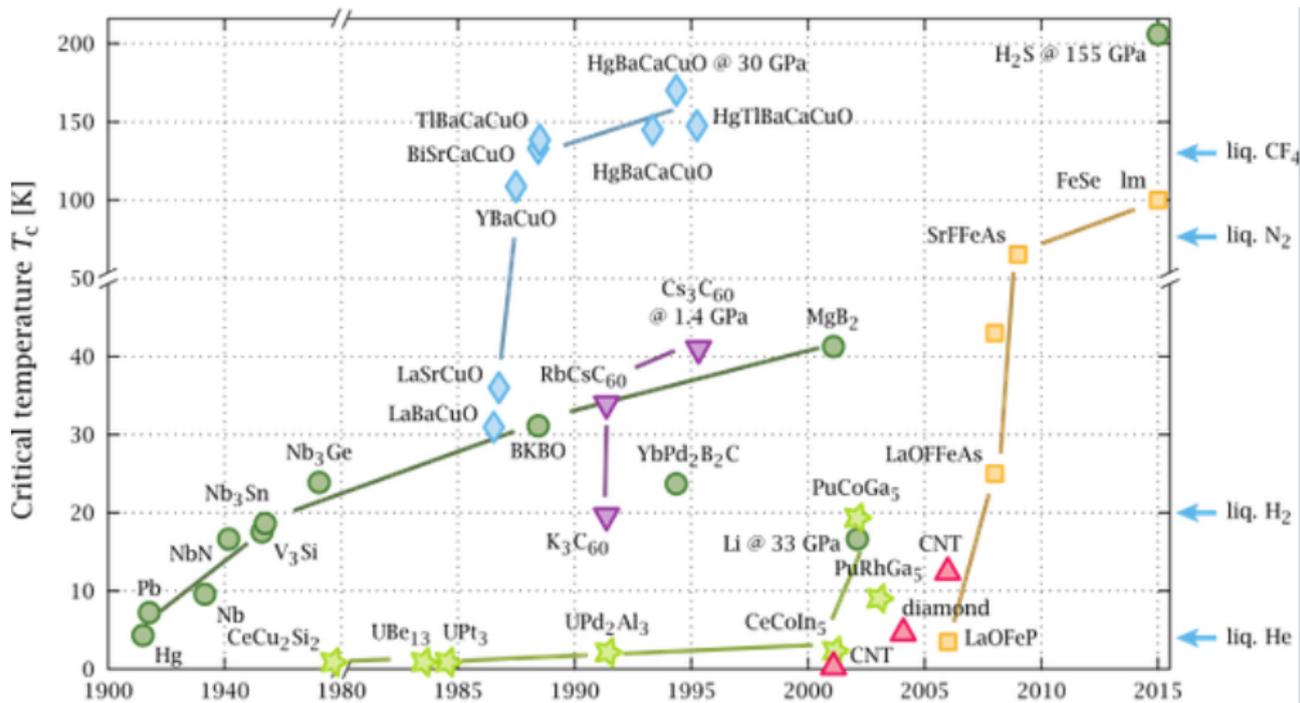
# Základní charakteristiky supravodičů

Základní parametry supravodičů:

- Kritická teplota -  $T_c$ , supravodiče s  $T_c > 35$  K (BCS teorie) - označovány jako vysokoteplotní supravodiče.
- Kritický proud, kritická hustota proudu -  $I_c, J_c$
- Kritické magnetické pole -  $B_c$

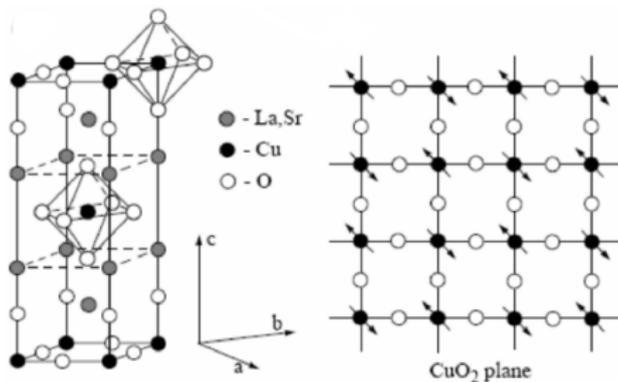
Supravodiče můžeme rozdělovat na supravodiče I. a II. druhu, podle poměru koherenční délky a hloubky vniku.





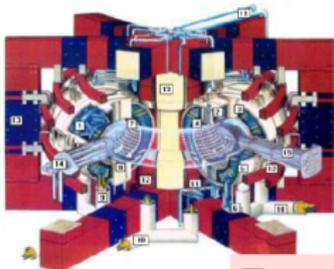
# Vysokoteplotní supravodiče

- Kupráty (nejrozšířenější HTS) - perovskity - keramické materiály
- Kritická teplota až  $T_c \sim 135$  K
- Silně anizotropní, supravodivé jsou  $\text{CuO}_2$  roviny
- Supravodiče II. druhu, malá koherenční délka uspořádání a velká hloubka vniku
- Typické malé dolní kritické pole a vysoké horní kritické pole (řádově 10 - 100 T)
- Další HTS:  $\text{MgB}_2$ , pniktidy, fulleridy ( $\text{Cs}_x\text{Rb}_y\text{C}_{60}$ ), vizmutáty



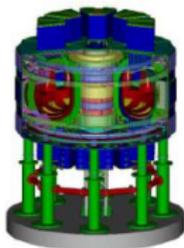
# Příklady využití supravodičů pro fúzi

- T-7, první supravodivý tokamak 1979, pracuje dodnes HT-7 (v Číně)
- Triam, první použití  $\text{Nb}_3\text{Sn}$
- W7-X, první supravodivý stellarátor
- JT-60SU, vrchol japonského supravodivého programu
- LHD, Tore Supra, KSTAR, EAST, SST1, ...



Tore Supra

(TF coils only)



SST-1

(NbTi coils)



KSTAR

( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ /NbTi coils)



EAST

(NbTi coils)

Celkem 48 nízkoteplotných supravodivých cívek

- 18 toroidálních cívek
- 6 modulů centrálního solenoidu
- 6 poloidálních cívek
- 9 párů korelačních cívek

System	Energy GJ	Peak Field T	Cond length km	Total weight t
Toroidal Field TF	41	11.8	82.2	6540
Central Solenoid	6.4	13.0	35.6	974
Poloidal Field PF	4	6.0	61.4	2163
Correction Coils CC	-	4.2	8.2	85

## Toroidální cívky

- $\text{Nb}_3\text{Sn}$
- Koláčově vinuté, kruhový nerezový plášť
- Provozní proud až 68 kA

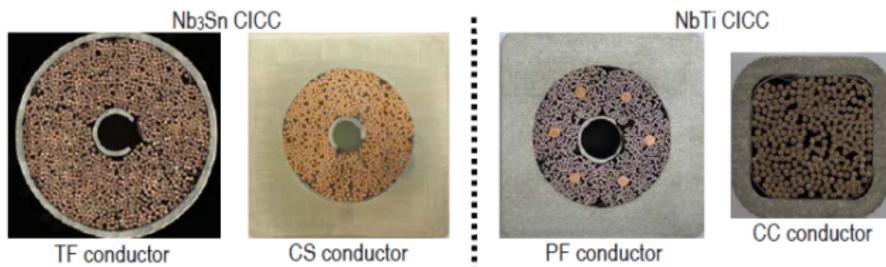
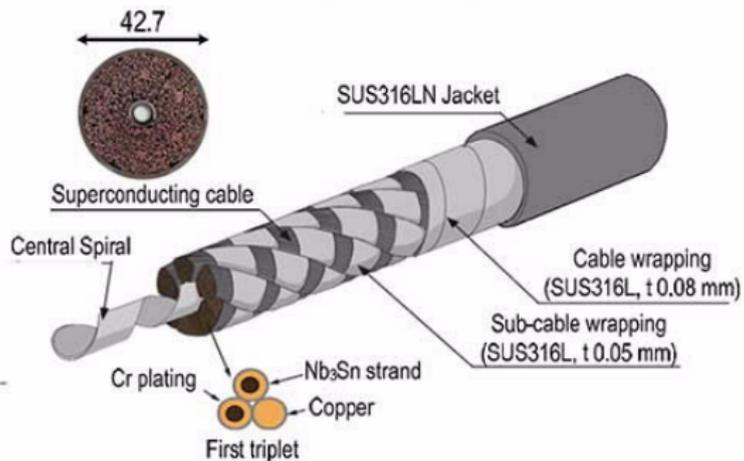
## Centrální solenoid

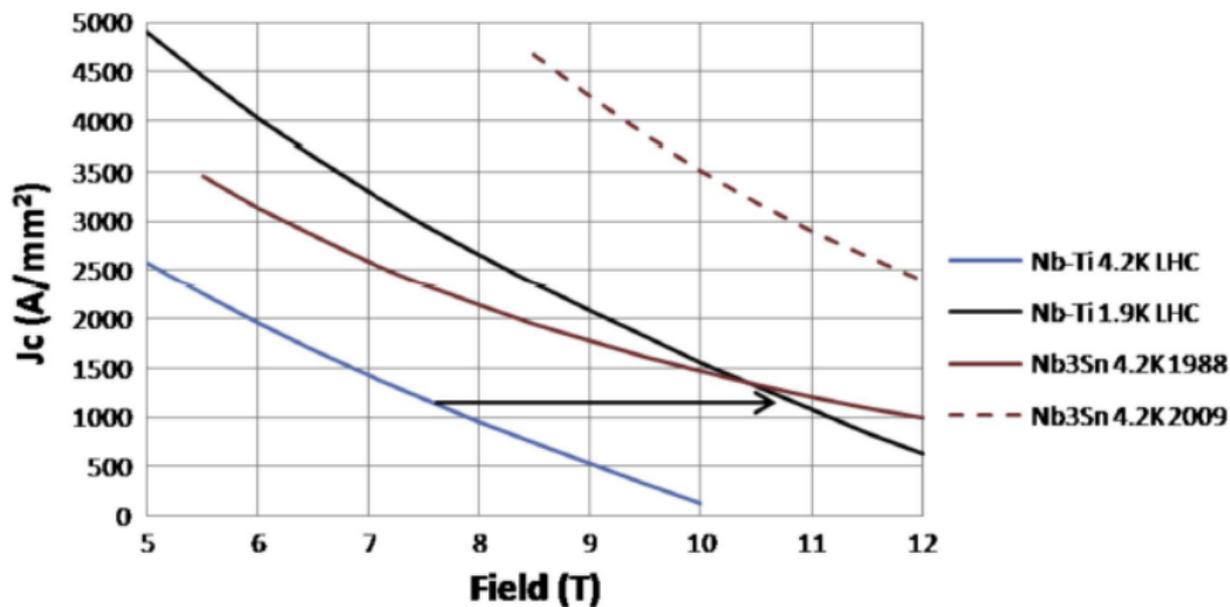
- $\text{Nb}_3\text{Sn}$
- Koláčově vinuté, čtvercový nerezový plášť
- Provozní proud až 45 kA

## Poloidální cívky

- $\text{NbTi}$
- Koláčově vinuté, čtvercový nerezový plášť
- Provozní proud až 45 kA

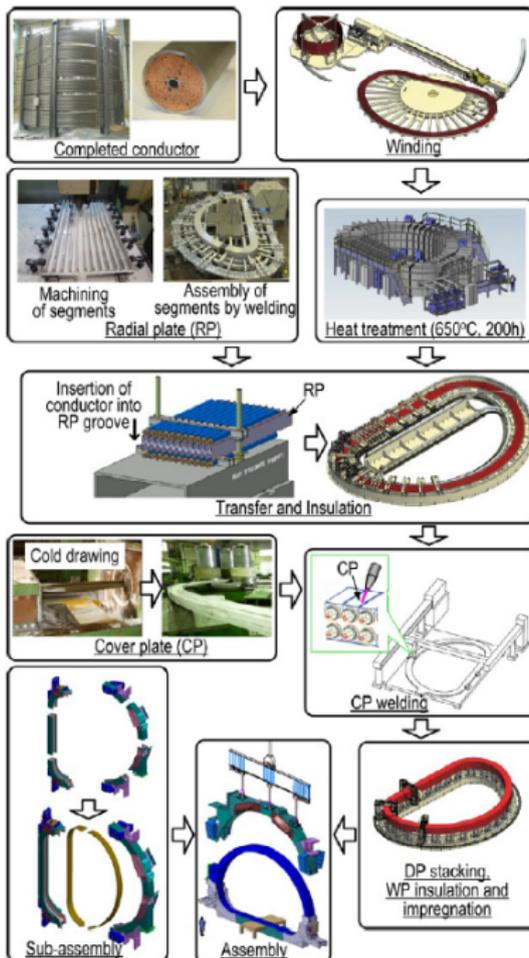
Všechny supravodiče budou chlazeny nadkritickým heliem o teplotě 4,5 K

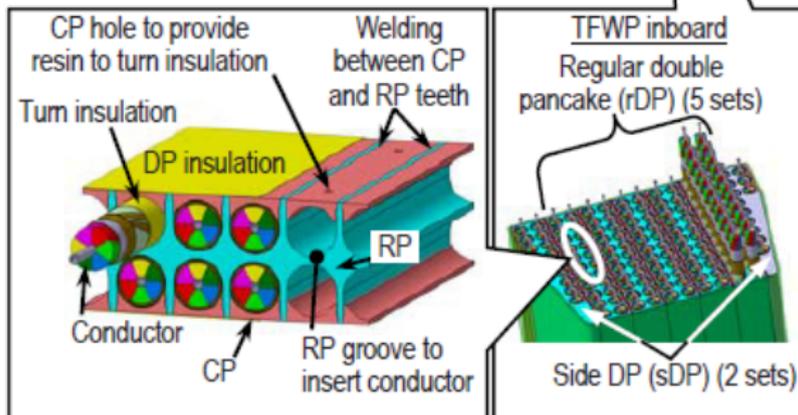
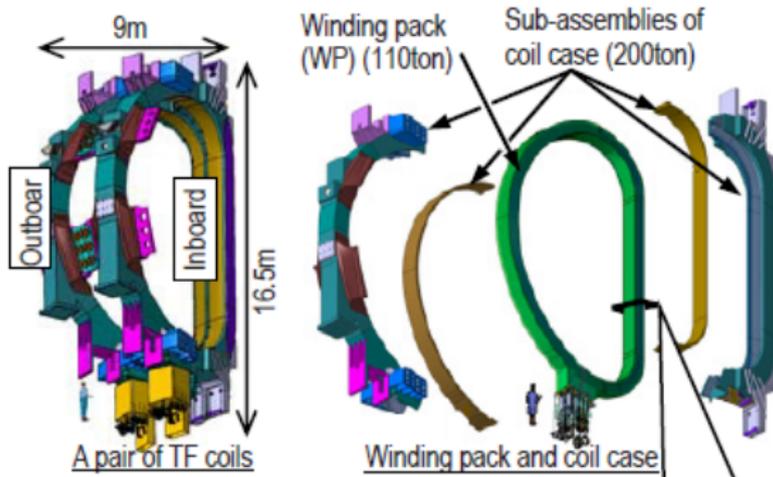




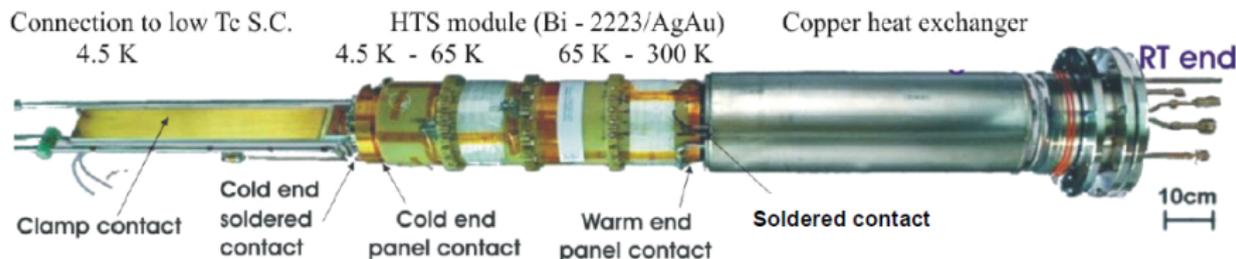
## Postup při výrobě toroidálních cívek

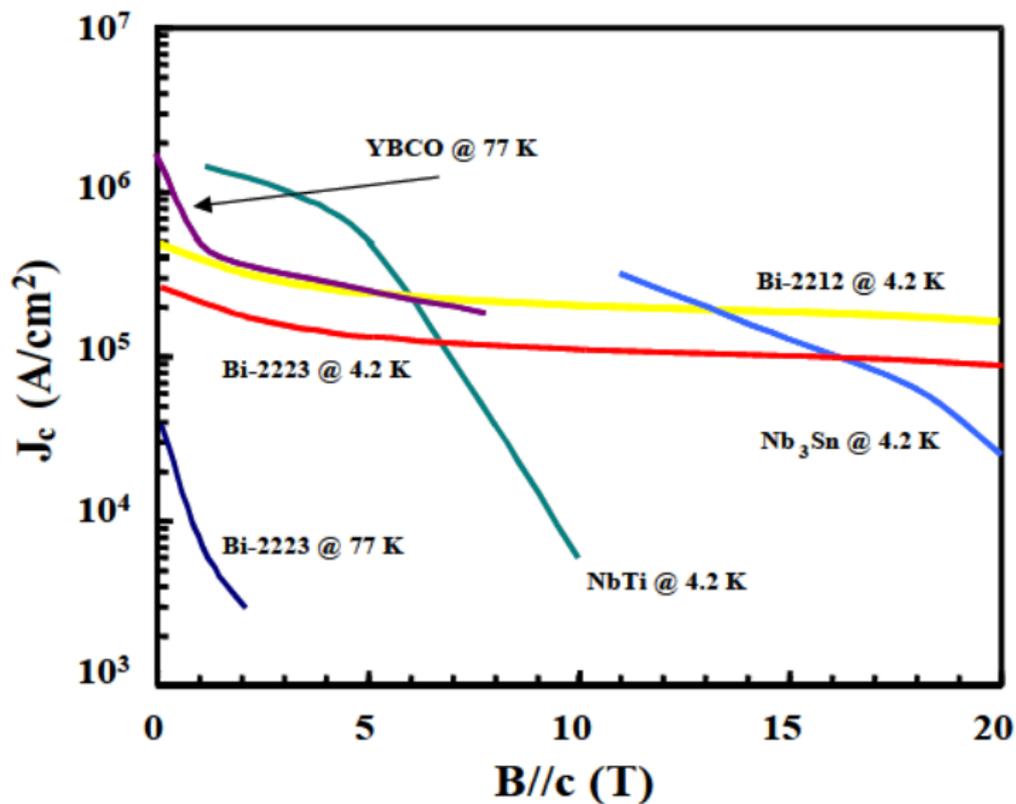
- Radiální konstrukce (Radial plate) je sestavena z jednotlivých částí
- Supravodič je navinut dvojitým koláčovitým vinutím do tvaru cívky (D-Shape)
- Supravodič je zahříván na 650 stupňů Celsia po dobu 200 h
- Vložení supravodiče do žlábků v radiální konstrukci a vytvoření izolace
- Sváření tzv. cover plate vrstvy, která zafixuje supravodič v radiální konstrukci
- DP (Double pancake) stacking, WP (winding pack) insulation and impregnation
- Montáž konstrukce





- Vysokoteplotní supravodiče zatím pouze jako přivaděče elektrického proudu
- Vysokoteplotní supravodiče dokáží ušetřit 20-30 %, ušetří okolo 22 kW na refrigerátoru
- Dokáže vést stabilně proud 68 kA až po dobu 6 minut i po odpojení He-chlazení.
- Aplikován i na projektech jako LHC, LHD, EAST a W7X.





Forschungszentrum vede program HTS4Fusion s následujícími body:

## 1) Conductor development

- HTS material development
- Development of cabling/bundling techniques for both wires and tapes
- Develop HTS cable concept for 20 kA class 12 T, >50 K
- Characterisation of HTS strands and sub-size cables
- Conductor development

## 2) Structural material in the cryogenic lab

- Prepare material database for structural materials beyond ITER
- Tests of advanced structural materials

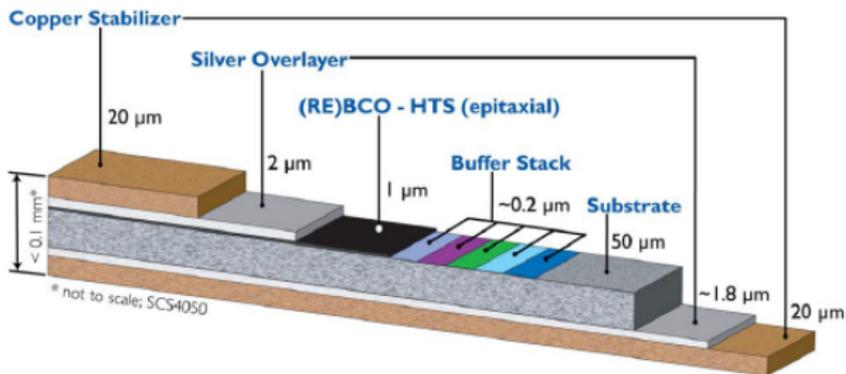
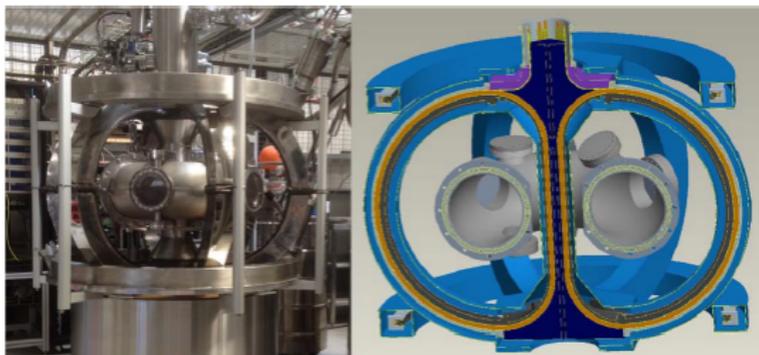
## 3) Demo-Solenoid

- Demo-Solenoid design & construction
- Demo-Solenoid test in TOSKA

## 4) HTS TF-Demonstration Coil

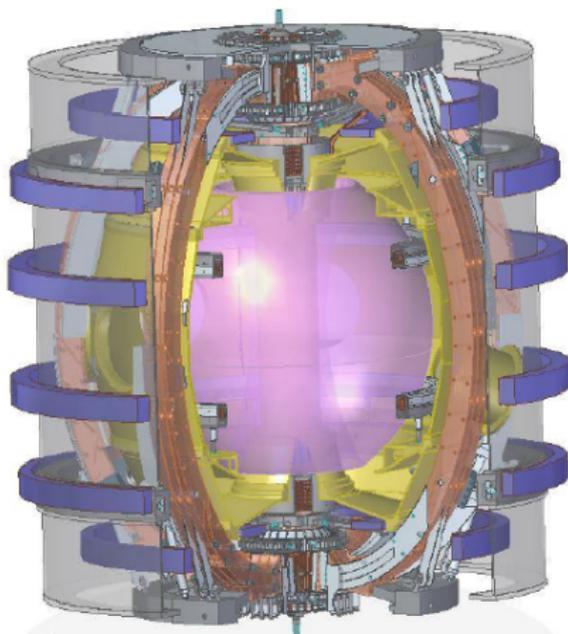
První tokamak s plně HTS magnetickým systémem, jednotlivé cívky testovány v r. 2015, použité 2G HTS REBCO pásy od SuperPower

<i>Parameter</i>	<i>TF coil</i>	<i>PF coil</i>	<i>Units</i>
Number of coils	6	2	#
Coil OD	0.63	1.21	m
Coil thickness	14.4	6.9	mm
layers	48	23	#
Winding type	Pancake	Pancake	
Tape length 1 coil	117	86	m
Operating current	417	378	A
Operating temperature, $T_{op}$	50	50	K
Peak field parallel to tape plane	0.99	0.68	T
Peak field perpendicular to tape plane	0.39	0.67	T
Field produced by coil system	0.1 (at major radius 25 cm)	0.002 (at centre of PF coil pair)	T
Calculated Critical Current at peak field, $T_{op}$	713	653	A



# HTS-ST25, ST40

- Nový plán (2017), navrhnout sférický HTS tokamak se silným mag. polem, předpoklad 3T
- Délka pulsu okolo 5 s, zatím se nedosahují vysoké teploty



- Popsat základní teorii supravodičů
- Metody chlazení, vliv neutronového záření
- Sestavit obsáhlý přehled supravodičů pro fúzi i jiné aplikace, zaměřit se na technické detaily, možnosti a problémy techniky supravodičů, teorie pro budoucí diplomovou práci

## **Další cíle pro diplomovou práci**

- Měření supravodičů od různých dodavatelů pomocí nových metod - určení kritického proudu ze změny magnetického momentu a časové odezvy při zapojení supravodiče ke zdroji střídavého proudu
- Možná vyhlídka výroby a měření vlastního supravodiče
- Naprogramování vyhodnocovacího algoritmu pro měření supravodičů

- [1] **HTS APPLICATIONS**, M. Noe, R. Heller, W.H. Fietz, W. Goldacker, Th. Schneider, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- [2] **High Temperature Superconducting (HTS) Coils for a Compact Spherical Tokamak**, Ziad Melhem, Steven Ball, Robin Brzakalik, Steve Chappell, Mikhail Gryaznevich, David Hawksworth, Dieter Jedamzik, Antti Jokinen, David Kingham, Alan Sykes, and Andy Twin
- [3] **ITER Superconducting Magnets**, Carlo Sborchia, Lecture on Fusion Reactor Engineering, Politecnico of Turin (I) 31 January 2011
- [4] **Progress of ITER superconducting magnet procurement**, N. Koizumi, JAEA, 801-1, Mukoyama, Naka, Ibaraki, 311-0193, Japan
- [5] **The ITER Magnets: Design and Construction Status**, N. Mitchell, A. Devred, P. Libeyre, B. Lim, F. Savary and the ITER Magnet Division, ITER Organization, Route de Vinon, 13115 St. Paul lez Durance, France

Děkuji za pozornost