

Wolframový prach jako významný odpad z jaderného fúzního reaktoru

Ing. Jaroslav Stoklasa, Ph.D.

Ing. Bc. Lucie Karásková Nenadálová, Ph.D.

TVIP Odpadové fórum 2025, Hustopeče, 14.10. - 16.10.2025

Wolframový prach jako významný odpad z jaderného fúzního reaktoru

Obsah

Jaderný fúzní reaktor a wolfram

Umístění W materiálů v zařízení

Původ vad různých wolframových materiálů

Vliv vodíku na poškození wolframu

Tvorba a akumulace prachu

Následky procesů při vzniku odpadního W prachu

Experimentální metody pro přepracování wolframového odpadního prachu

MSO (oxidace roztavenou solí)

Indukční ohřev

Jaderný fúzní reaktor a wolfram

Hořící plazma



Plodící obal (BB)



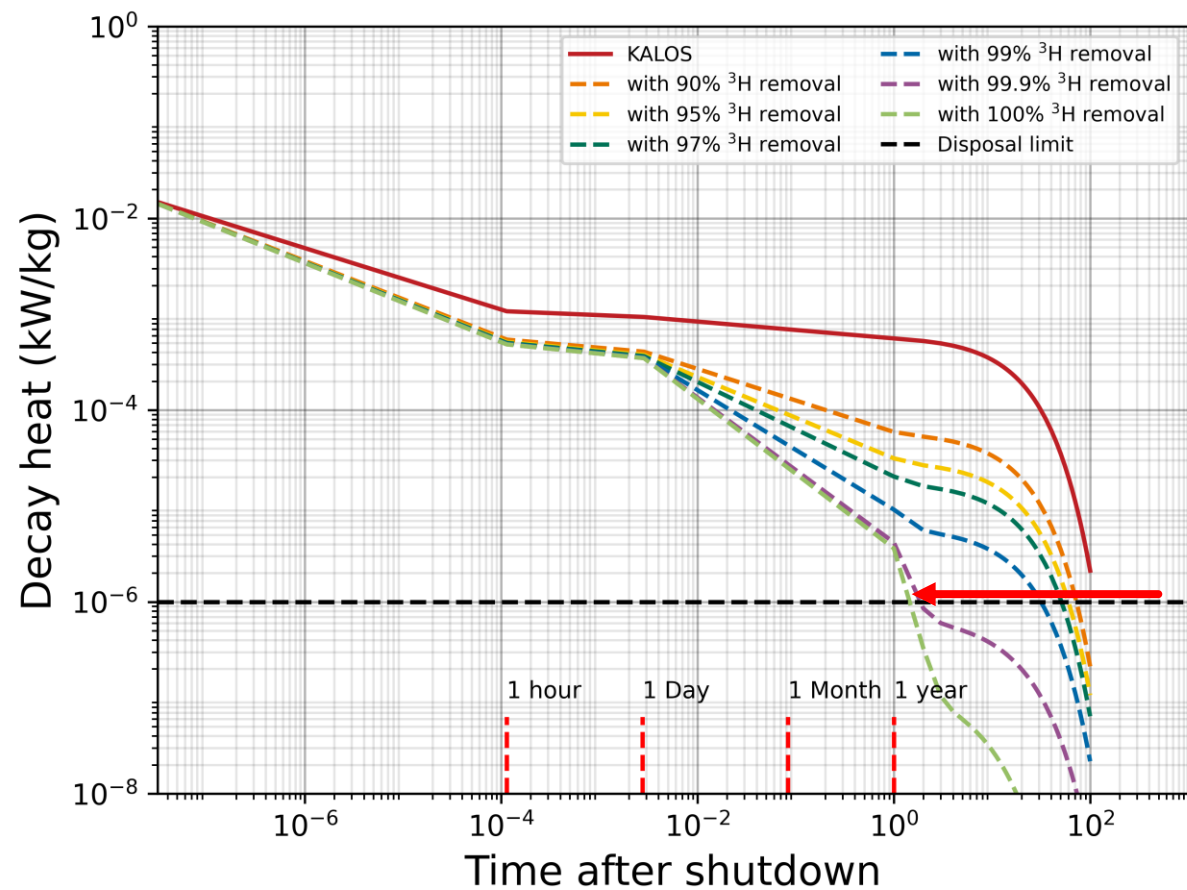
Celkově bilance

deuterium+ lithium → helium+ energie

Množství prachu s tritiem

- ▶ Produkční limity pro ITER jsou stanoveny na 1 kg pro tritium, 1 000 kg pro mobilizovatelný prach, 11 kg (beryllium) a 76 kg (wolfram) pro prach na horkých površích
- ▶ Základem pro výpočty EU DEMO je typická experimentální kampaň ITER, která trvá přibližně 2 roky, během nichž se plánuje 5000-7000 vypouštění
- ▶ Očekávaná zásoba prachu v takových podmínkách při normálních i abnormálních událostech je 1 tuna / rok plného provozu EU DEMO
- ▶ Eroze wolframu během normální plazmatické operace odhadovaná na 3000 kg/FPY dle měření na JET

Koncentrace tritia v průběhu palivového cyklu fúzního reaktoru



Odstranění tritia z materiálu

- Klíčová je detritiace v palivovém cyklu a odpadu
- Dopad na nakládání s odpady
- **Kritéria** pro přijetí odpadu

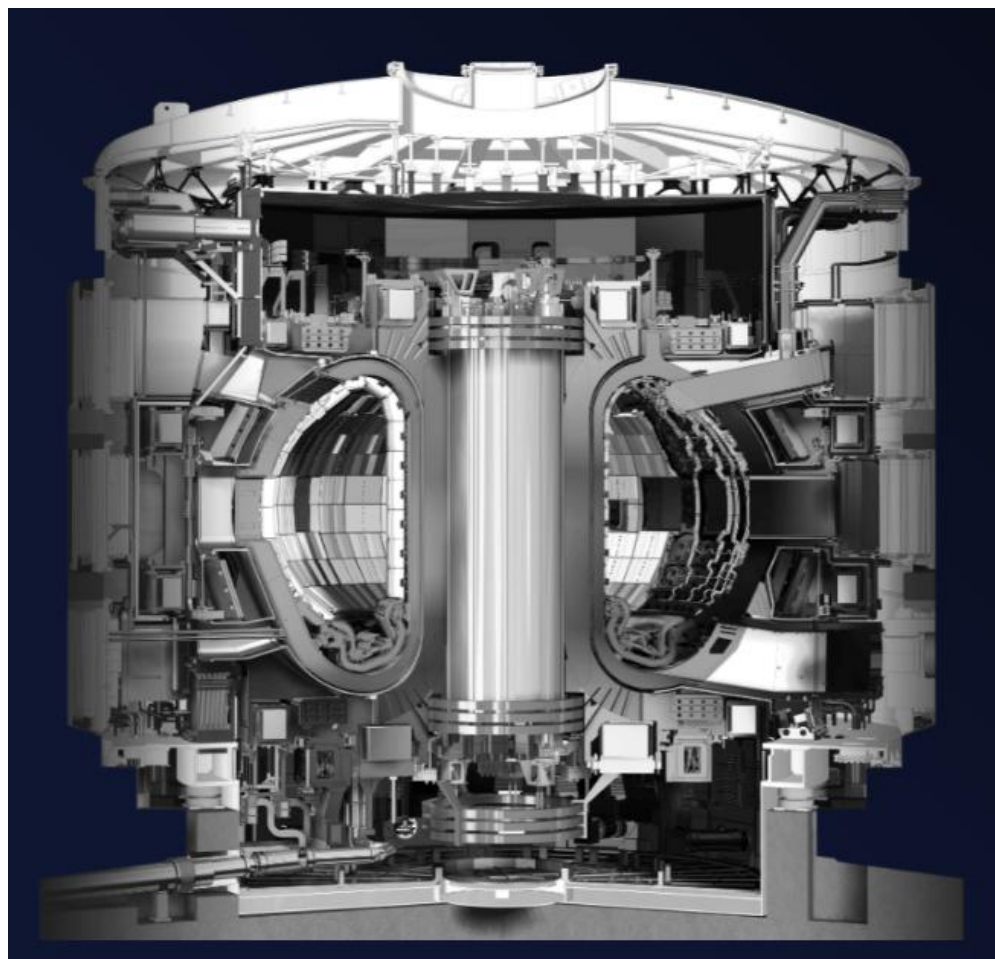
Změna rozpadového tepla v reaktoru KALOS (lithium orthosilicate pebbles $\text{Li}_4\text{SiO}_4\text{-Li}_2\text{TiO}_3$) s různými rychlostmi extrakce tritia a **limitem pro ukládání**

Poločas rozpadu je 12,32 let.

Rosanvallon S. Radiation Waste Management (29 Jan 2025)

Umístění wolframových materiálů v tokamaku

www.iter.org/machine



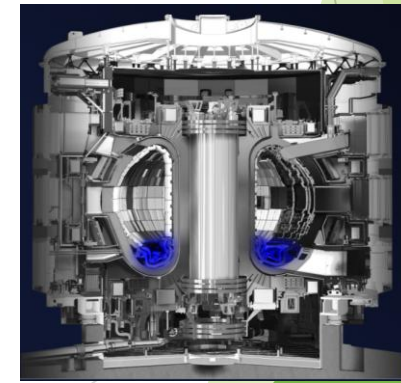
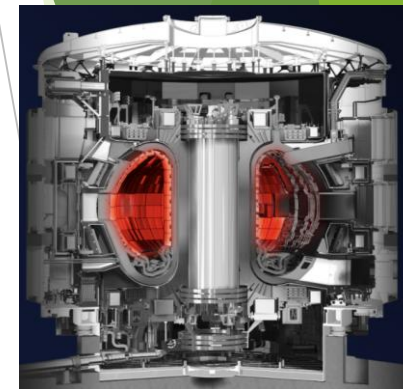
Sekce nebo skupina s wolframem

Modul **Blanketu** (BB)

Divertor

Kombinace pancéřování kompozitního W a W vláken

Vakuová nádoba



Poškození wolframových materiálů

Původ vad různých wolframových materiálů

- ▶ Opotřebení **vnitřního povrchu** tokamaku
důsledek činnosti tokamaku nebo jeho části
povrch obrácený k plazmatu: ozařován vysoce energetickými částicemi deuteria, tritia a helia,
- ▶ **Komponenty divertoru**: patří k nejintenzivněji zatěžovaným (tepelné zatížení až 10-20 MW/m²)
- ▶ **Kvalitu prachu** ovlivňují vysoké teploty a jiné proměnlivé parametry při jeho vzniku - magnetické a elektrické pole, neutrony, tlaky a složení plynů

Vliv vodíku (D, T) na poškození wolframu

- ▶ rozhraní a změny materiálu: na **propustnost toku** (médií, částic, vakance) mají zanedbatelný vliv
- ▶ mikrostruktura vrstvy: **propustnost toku** silně ovlivňuje

Průběh poškození (mikro destrukce) a hnací mechanismy

- ▶ mechanická (eroze, proudění), fyzikální procesy (teplota a tlak), difúze (částice, vakance), chemické procesy (kov a vodík), frakcionace, transformace a rozpad izotopů (přeměna T-He)
- ▶ vliv nečistot materiálu (katalýza, zdroj)

Odpadní wolframový prach

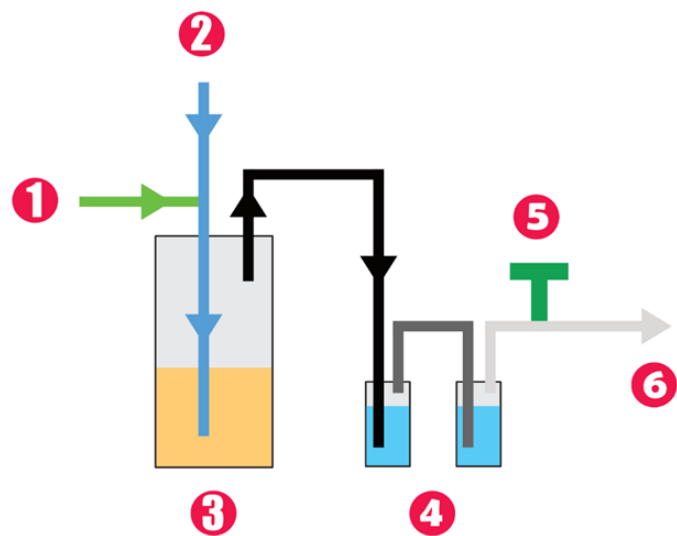
Tvorba a akumulace prachu

- ▶ Primárním **zdrojem prachu** místa narušení povrchu materiálu
- ▶ tvorba a obnova defektů vyvolaných neutronovým zářením
- ▶ zatím chybí údaje o lomové mechanice, únavě nebo creepu a o bobtnání dutin vyvolaném zářením pro širší rozsah teplot a dávek
- ▶ gravitační pohyb vede k hromadění prachových částic na podlaze vakuové nádoby.

Následky procesů při vzniku odpadního W prachu

- ▶ **Narušení kompaktního povrchu** do různé hloubky až k uvolnění částic kombinací různých fyzikálních, chemických nebo radiologických jevů (neutrony, záření α, β, γ)
- ▶ zrna různých rozměrů, tvarů a velikosti
- ▶ rozmanitá vnitřní pórovitost i kvalitu povrchu v mikro rozměrech.

Schéma laboratorní aparatury MSO



- ▶ 1 - hnací plyn (vzduch),
- ▶ 2 - dávkovač W pelet,
- ▶ 3 - reaktorová nádoba,
- ▶ 4 - vodní bublinky,
- ▶ 5 - vývěva,
- ▶ 6 - ventilace



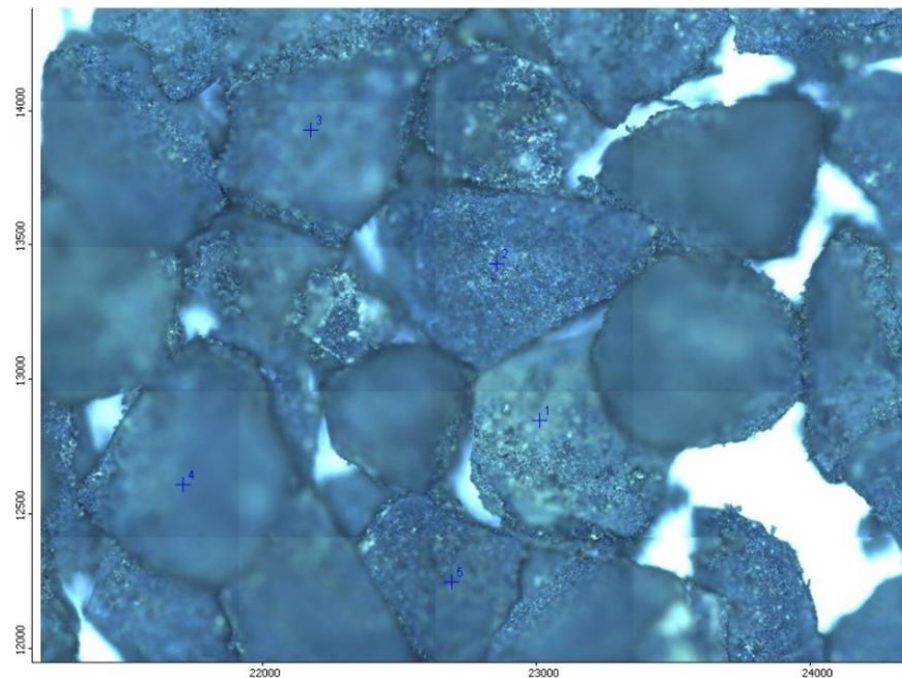
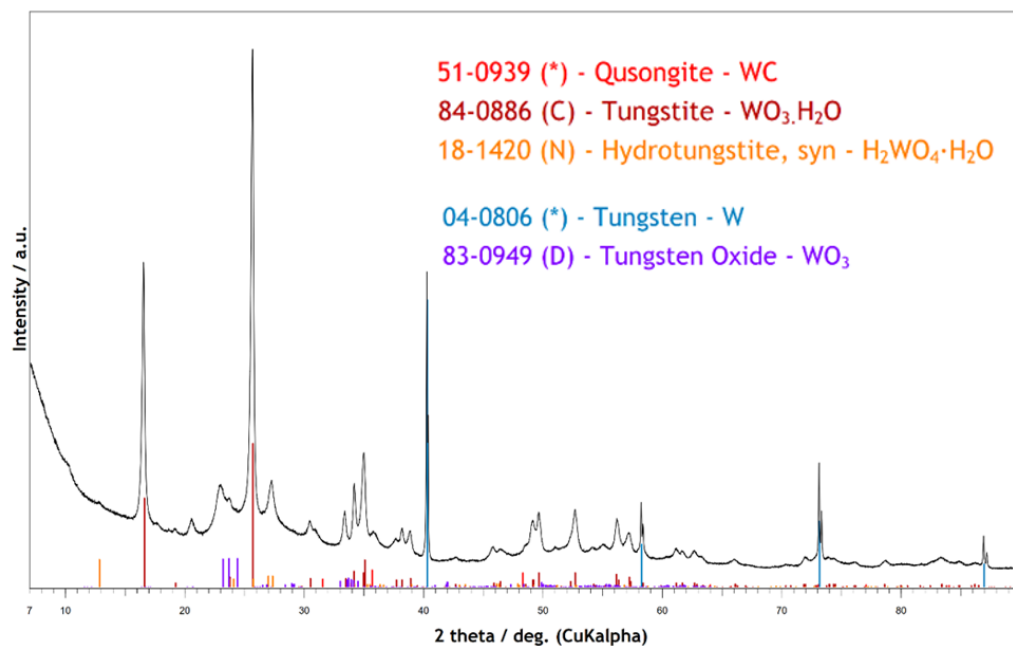
Vstupy a výstupy pevných složek experimentální práce s wolframovou frakcí v roztavených uhličitanových alkalických solích

Frakce W	≤ 20 μm	0,4-0,8 mm	1-2 mm	≤ 20 μm	0,4-0,8 mm	1-2 mm	≤ 20 μm	0,4-0,8 mm	1-2 mm
	Na ₂ CO ₃ ; t 950 °C			Li ₂ CO ₃ ; t 800 °C			K ₂ CO ₃ ; t 980		
Vstup W (g)	20,697	20,104	20,384	19,60	20,00	20,00	20,047	20,505	20,251
Metal W (g)	0,631	8,852	10,199	3,101	19,322	19,432	1,328	9,395	12,963
WO ₃ ·xH ₂ O (g)	13,724	2,553	5,428	18,277	0,755	5,358	15,191	4,339	0,412

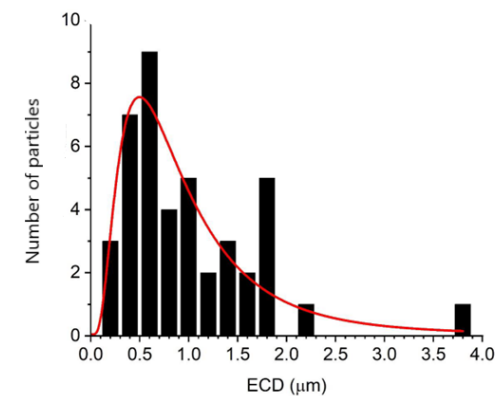
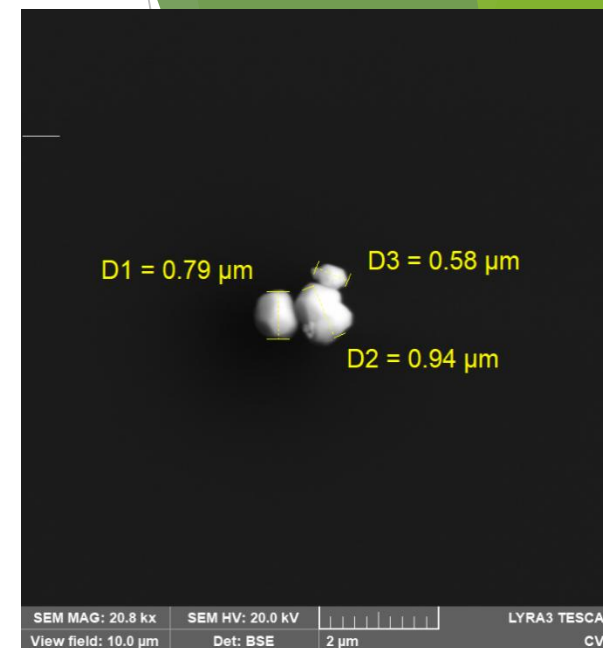
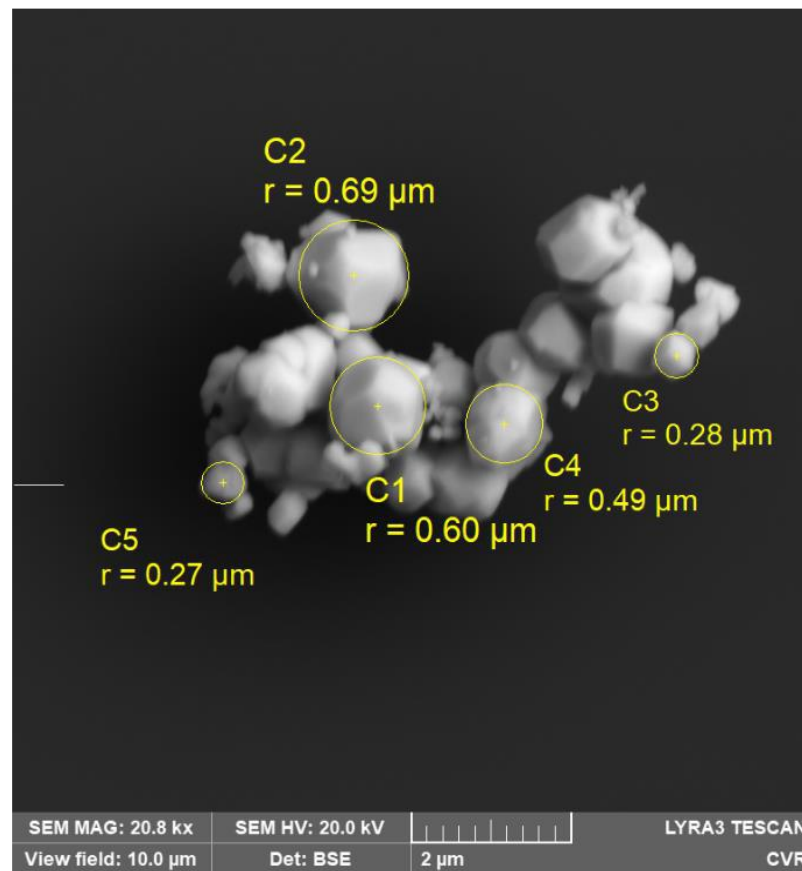
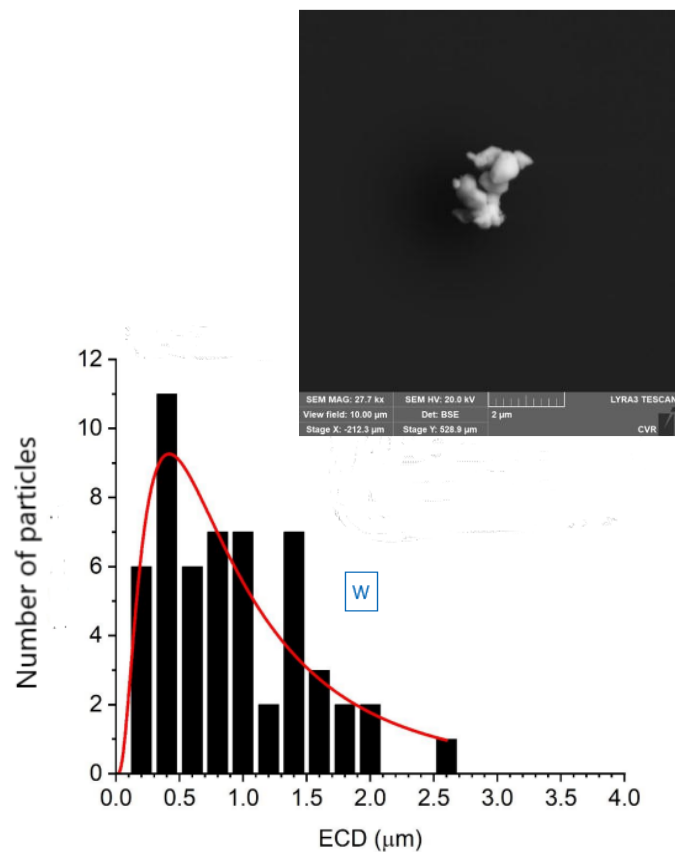
MSO - roztavená sůl Li_2CO_3 při teplotě 800°C

Analýza XRD kovových zrn W o velikosti $20\text{ }\mu\text{m}$ z reaktoru MSO.

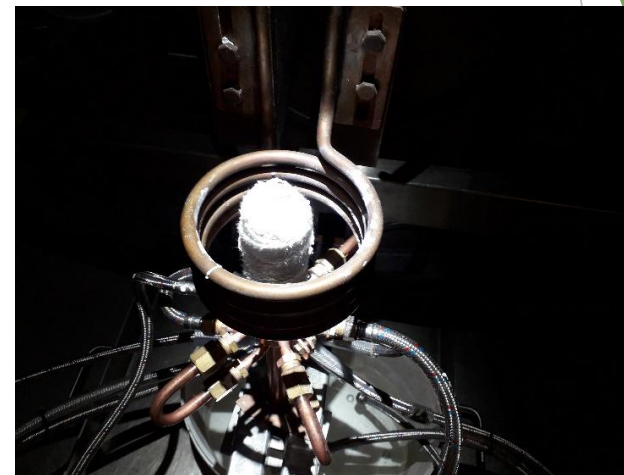
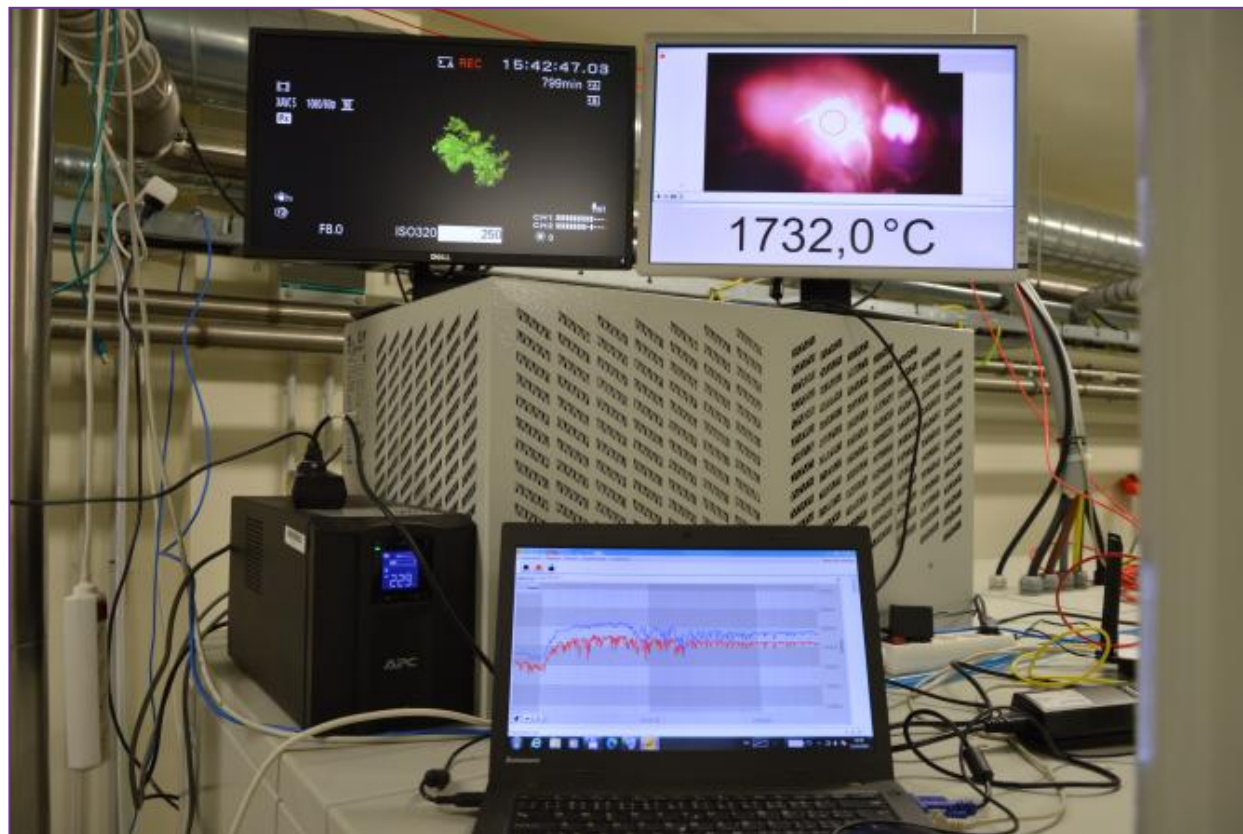
Ramanova spektroskopie finálního vzorku W, velikost zrn $0,4\text{--}0,8\text{ mm}$



Rastrovací elektronový mikroskop: Rozložení velikosti wolframových částic



Indukční ohřev ve studeném kelímku



Před ohřevem



Po ohřevu

Indukční ohřev vzorku



W prach 0,4-0,8 mm



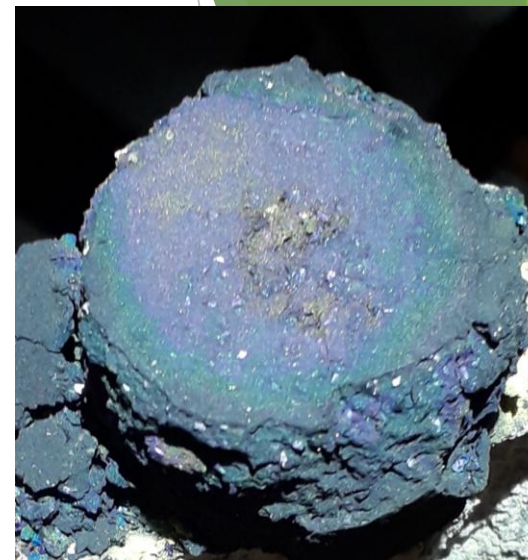
Slisovaný W prach



Jednoduchá sestava pro ohřev vzorku wolframu



Wolfram po nepřímém indukčním ohřevu na vzduchu



Wolfram po přímém indukčním ohřevu na vzduchu

Řez vzorkem ze slinutého wolframu

Shrnutí

- ▶ Místa a původ vzniku W odpadu byla sledována především s ohledem na budoucí EU DEMO zařízení.
- ▶ Sledována možnost recyklace wolframových prachových částic, wolfram je strategická surovina.
- ▶ Při užití MSO technologie je zachyceno tritium ve formě tritiové vody.
- ▶ Při užití technologie indukčního ohřevu:

bez přístupu vzduchu (ve vakuu nebo ve směsi s inertním plynem) je možné oddělit plynné tritium,

s přístupem vzduchu je zachyceno tritium ve formě tritiové vody

- ▶ Obě technologie mohou velmi účinně oddělit wolfram od tritia.
- ▶ **Testovány změny wolframového prachu při použití obou technologií**
- ▶ Reálné je využít odděleně koncentrovaných vysoce kvalitních surovin (tritium nebo wolfram) k přepracování v průmyslové objemu.
- ▶ Zatím není přesně známo budoucí a konečné řešení návrhu celé sestavy zařízení EU DEMO. Nejvíce se mu blíží zařízení ITER ve výstavbě.

Děkuji za pozornost

www.cvrez.cz

Jaroslav.Stoklasa@cvrez.cz
Lucie.Nenadalova@cvrez.cz

Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Oddělení 8840: Fúzní technologie
Husinec - Řež čp. 130
250 68 Řež u Prahy