



ENERGETICKÉ VYUŽITÍ JADERNÉ FÚZE

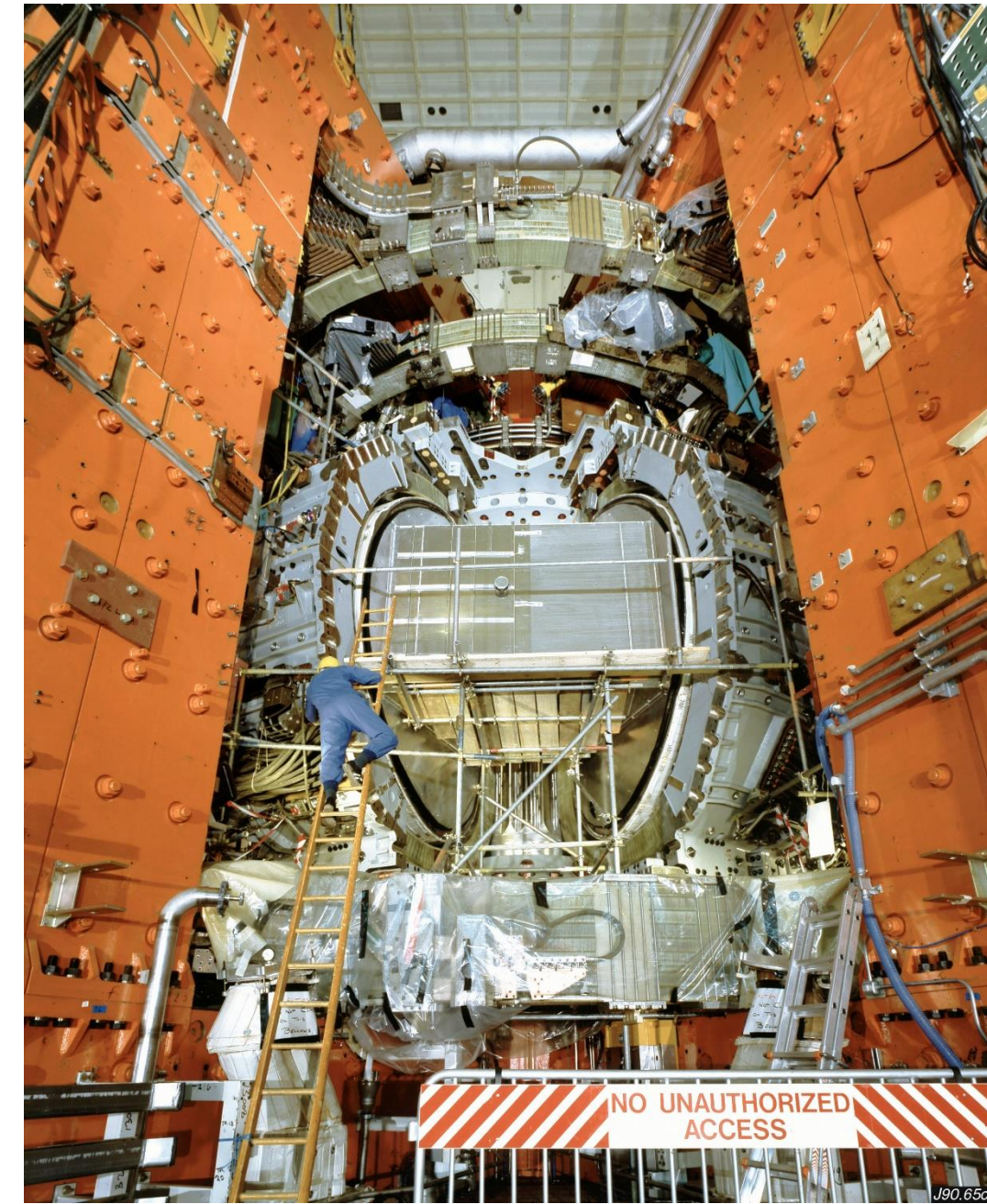
Ing. Slavomír Entler ^{a,b}

^aČeské vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6

^bÚstav fyziky plazmatu AV ČR, Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8

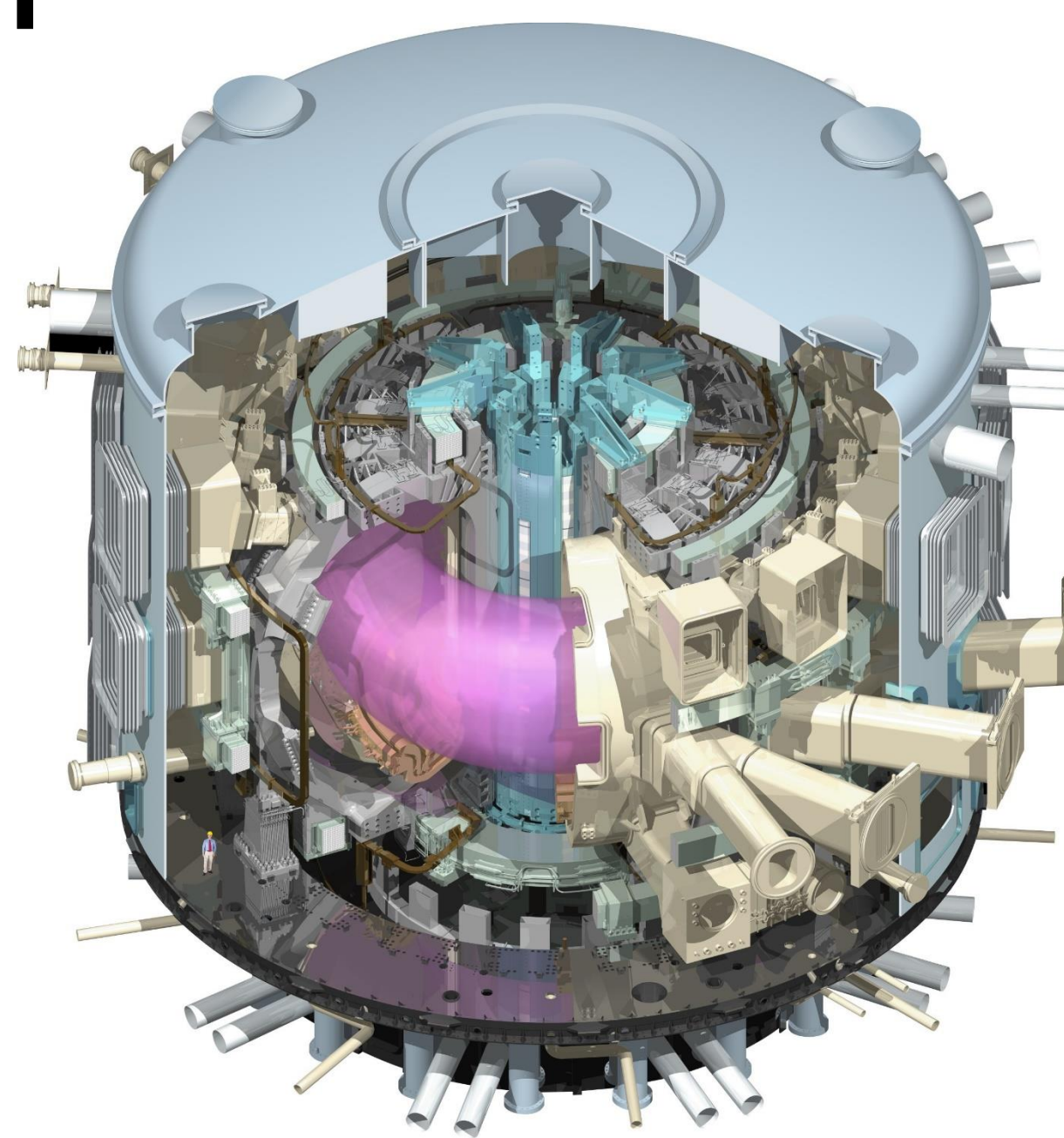
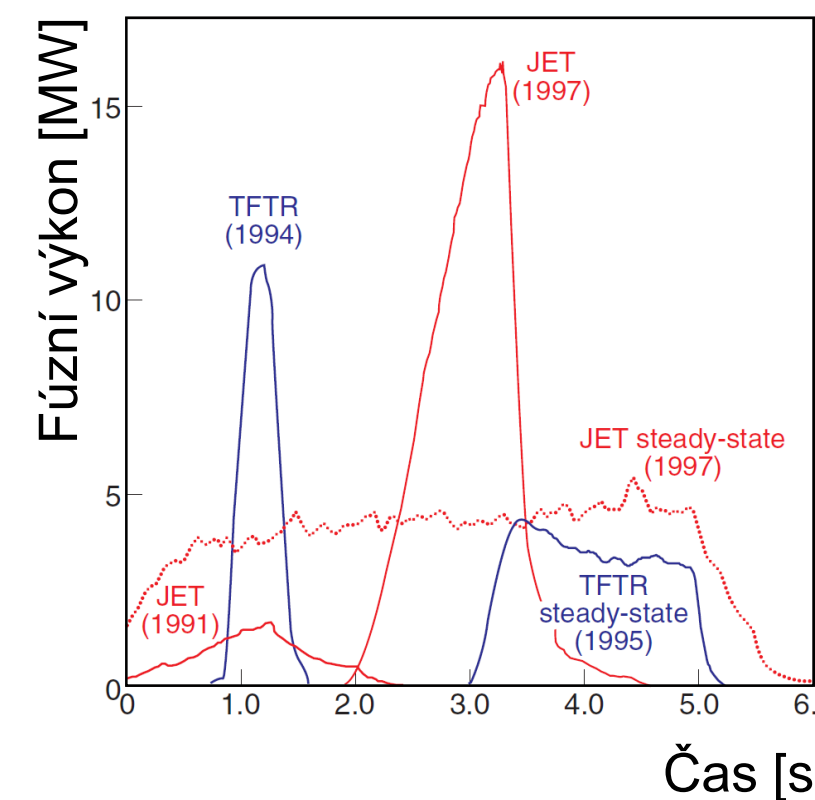
Školitel
Školitel-specialista

Doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.^a
Ing. Ivan Ďuran, Ph.D.^b



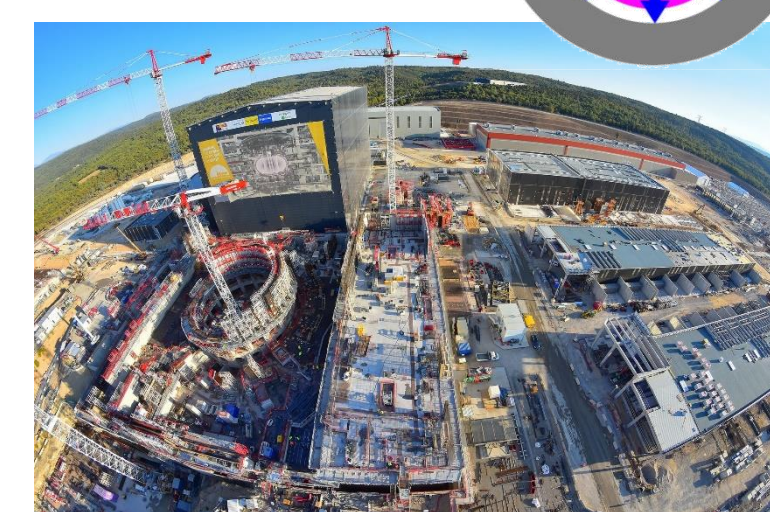
FÚZNÍ REAKTOR JET

V roce 1997 dosáhl fúzní reaktor JET (Joint European Torus) fúzního výkonu 16 MW. Tím byl podán důkaz o uskutečnitelnosti uvolňování energie řízenou jadernou syntézou.

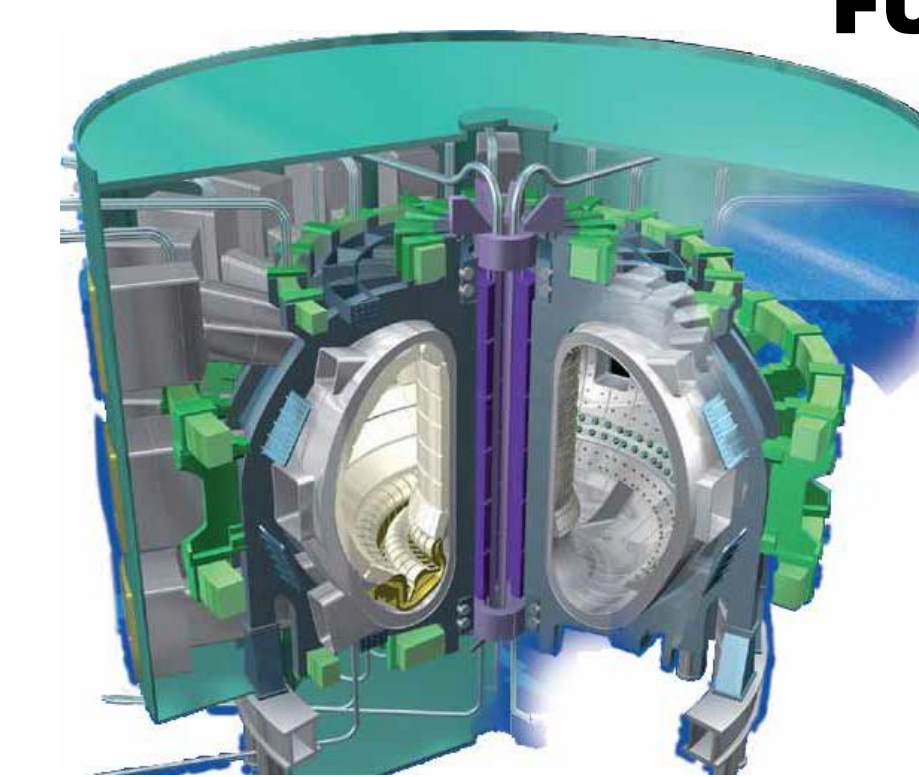


PROJEKT ITER

Reaktor ITER o fúzním výkonu 500 MW, který se staví ve francouzské Provence, bude testovat zařízení a technologie pro první fúzní elektrárny.
Podpis 1987
Zahájení 2007
1. plazma 2025
500 MW 2036



FÚZNÍ ELEKTRÁRNA DEMO



Na projekt ITER přímo navazují projekty DEMO mající za cíl vyvinout a postavit elektrárnu s fúzním reaktorem. V roce 2012 Evropská komise definovala záměr Evropské unie zahájit výrobu elektrické energie pomocí jaderné fúze do roku 2050. Koncepční práce byly zahájeny v roce 2014, projektování elektrárny má být zahájeno v roce 2020.

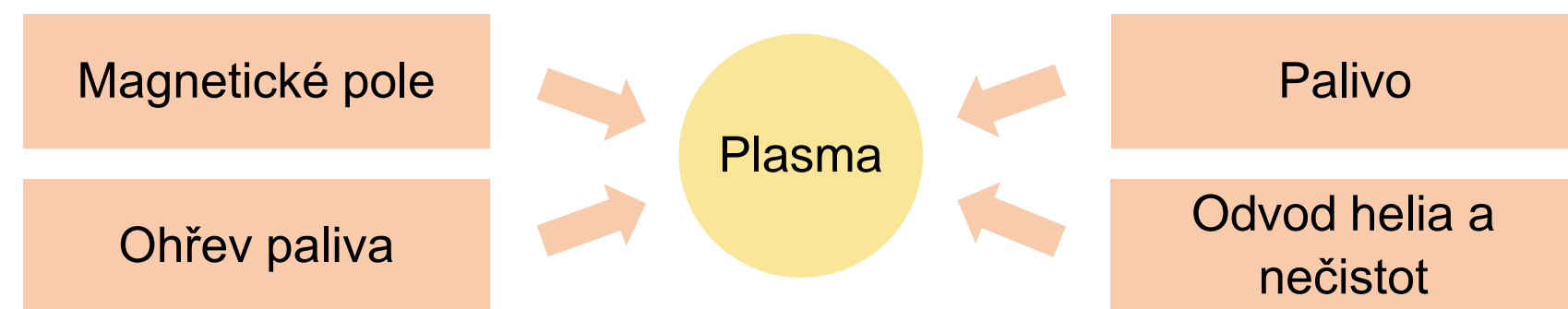
CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

1. Identifikace charakteristických rysů budoucí fúzní energetiky.
2. Analýza energetické bilance budoucích fúzních elektráren z hlediska recirkulace vysokého výkonu ohřevu paliva na vysoké teploty.
3. Vyvinutí prototypu teplotně a radiačně odolných senzorů ustáleného magnetického pole pro mezinárodní reaktor ITER.

IDENTIFIKACE CHARAKTERISTICKÝCH RYSŮ BUDOUCÍ FÚZNÍ ENERGETIKY

Z fyzikální podstaty jaderné fúze vyplývají tři klíčové fyzikální rysy, které budou determinovat vlastnosti fúzní energetiky: palivo z lehkých chemických prvků, vysoká pracovní teplota paliva, vysoký energetický tok v reaktoru. Tyto klíčové rysy implikují:

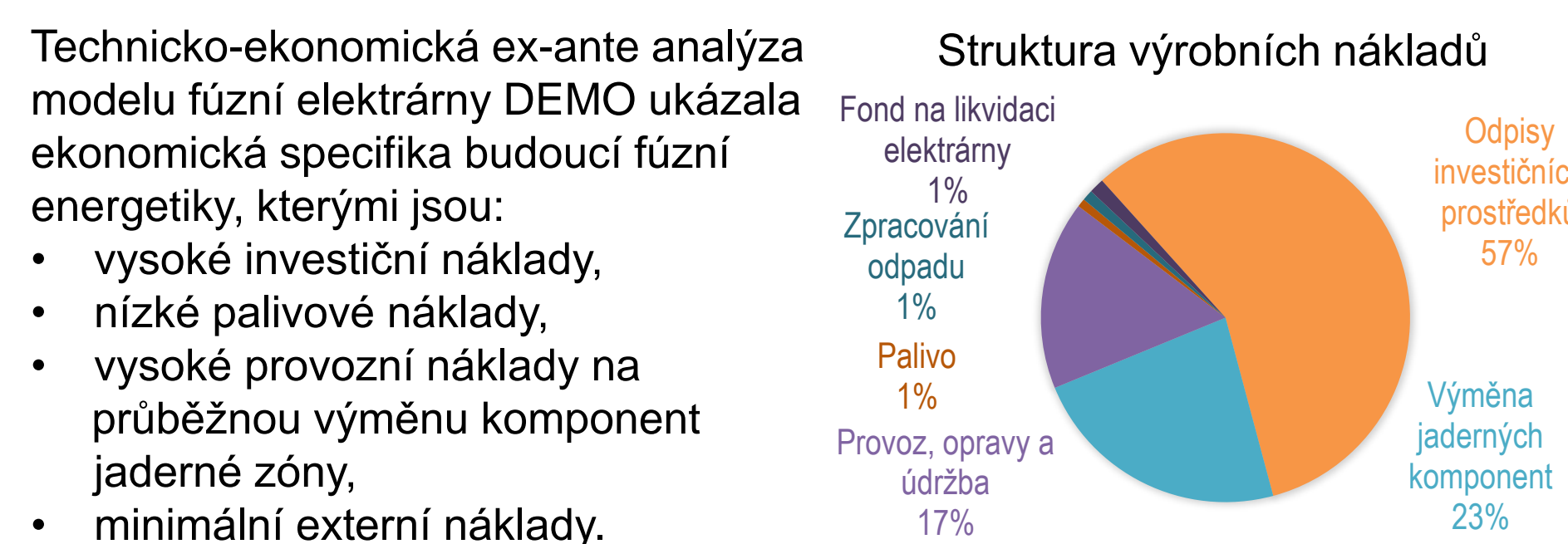
- prakticky nevyčerpatelné a dostupné zásoby paliva,
- bezemisní výrobu,
- inherentní jadernou bezpečnost fúzních reaktorů,



- minimální vliv na životní prostředí,
- recirkulaci výkonu ohřevu paliva,
- nízkou životnost jaderných komponent,
- vznik sekundárně aktivovaných radioaktivních odpadů,
- specifickou strukturu výrobní ceny elektrické energie.

Bylo zjištěno, že vliv fúzní energetiky na životní prostředí bude plně srovnatelný s vlivem obnovitelných zdrojů energie.

Za hlavní současnou překážku konkurenceschopného energetického využití jaderné fúze byla identifikována nedostupnost materiálů a konstrukcí komponent jaderné zóny schopných dlouhodobě odolávat neutronové a tepelné zátěži. Vysoká technologická náročnost a krátká životnost jaderných komponent se negativně promítá do výrobních nákladů a do objemu sekundárně aktivovaného radioaktivního odpadu.

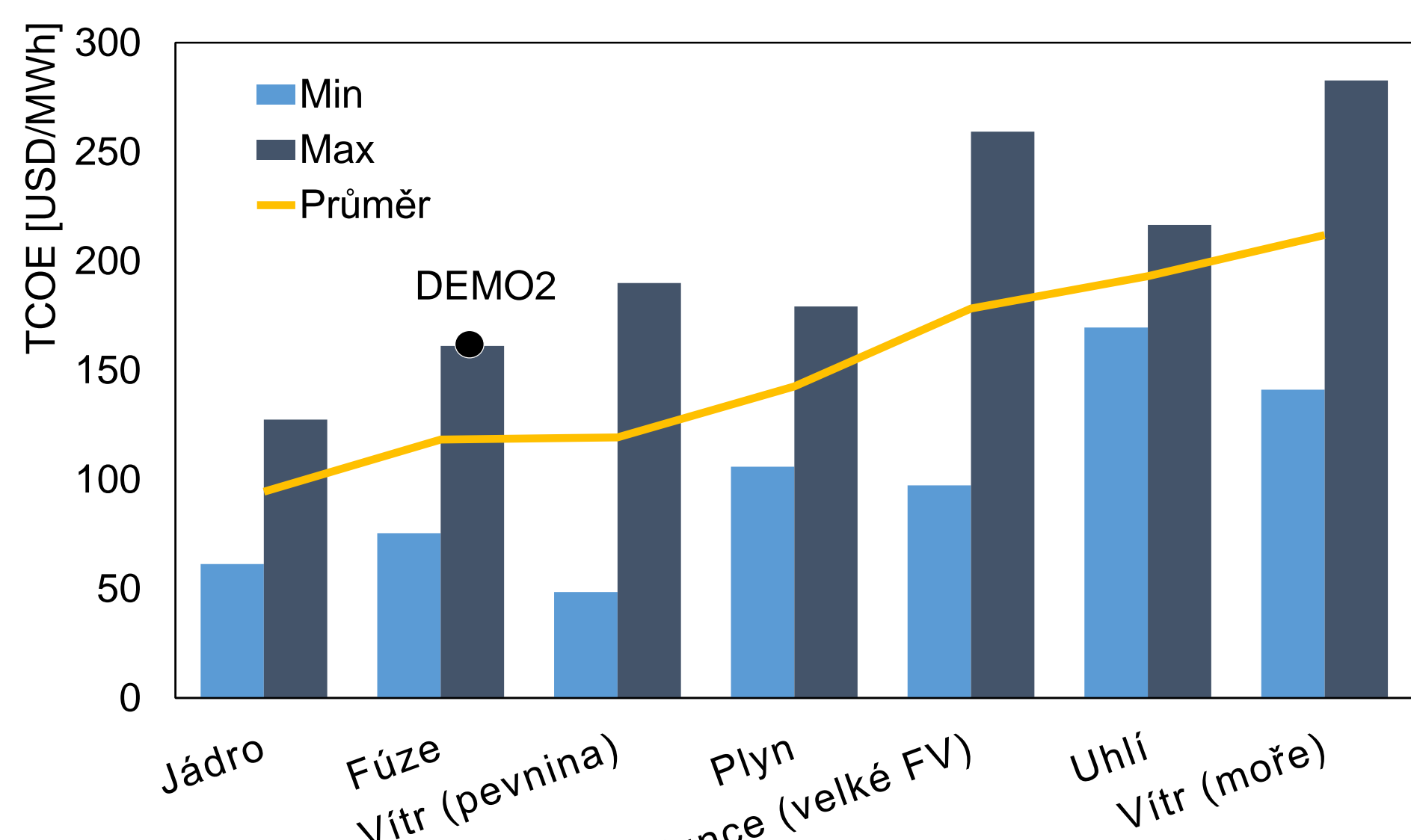


Technicko-ekonomická ex-ante analýza modelu fúzní elektrárny DEMO ukázala ekonomická specifika budoucí fúzní energetiky, kterými jsou:

- vysoké investiční náklady,
- nízké palivové náklady,
- vysoké provozní náklady na průběžnou výměnu komponent jaderné zóny,
- minimální externí náklady.

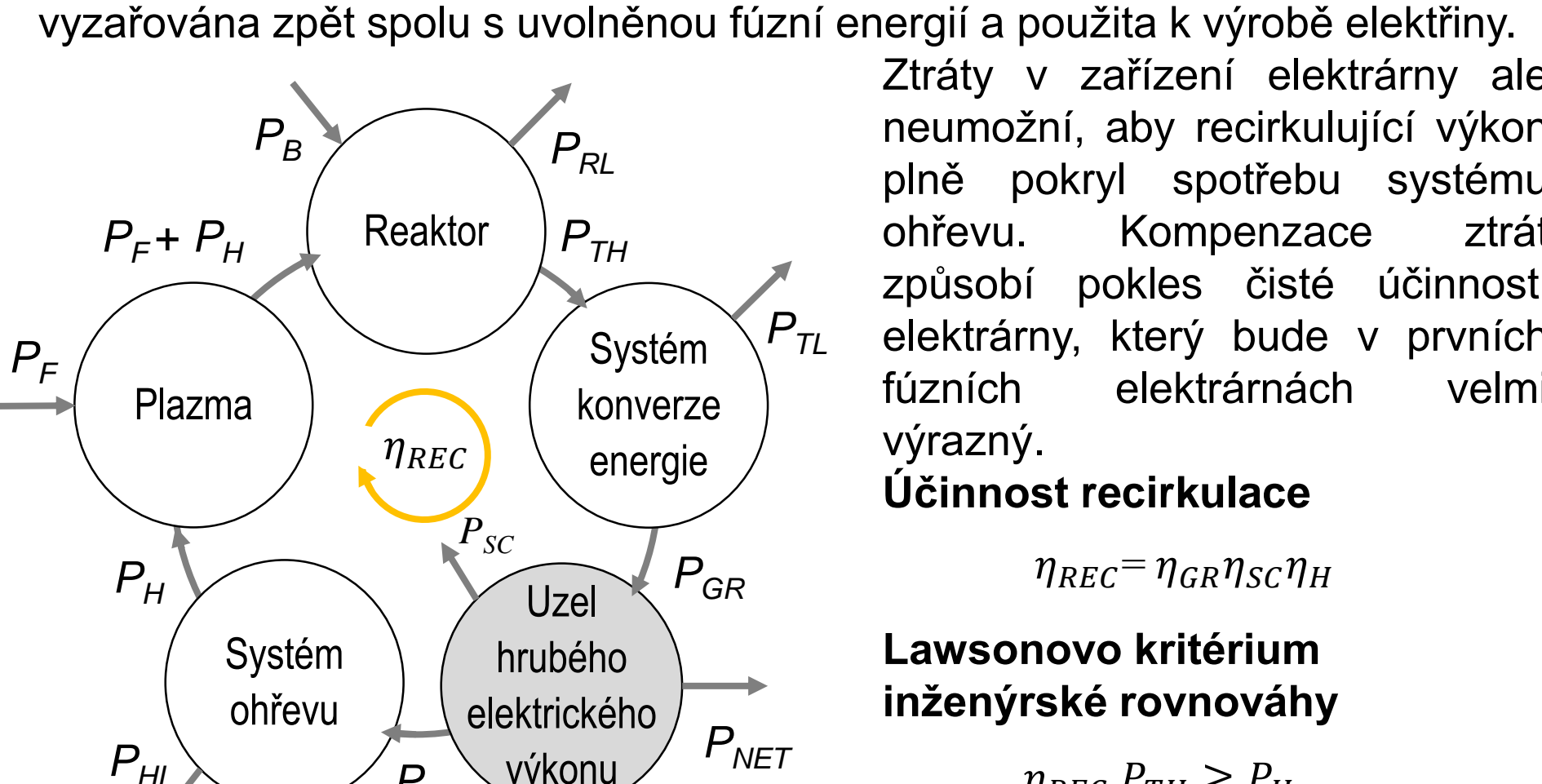
Analýzovaný model fúzní elektrárny byl shledán při současných cenách elektřiny jako nerentabilní a jeho realizace by si vyžádala dotaci výkupní ceny elektřiny, která by ale byla nižší, než je poskytovaná podpora fotovoltaických elektráren.

V případě internalizace externích nákladů výroby elektřiny by fúzní elektrárny byly jedním z ekonomicky nejvýhodnějších energetických zdrojů.



ANALÝZA ENERGETICKÉ BILANCE BUDOUCÍCH FÚZNÍCH ELEKTRÁREN

Analýza energetické bilance budoucích fúzních elektráren vychází z Lawsonova kritéria inženýrské rovnováhy a ukazuje hlubokou souvislost tohoto kritéria s čistou účinností výroby elektrické energie z hlediska recirkulace výkonu ohřevu. Energie ohřevu vložená do plazmatu bude vyzařována zpět spolu s uvolněnou fúzní energií a použita k výrobě elektřiny.

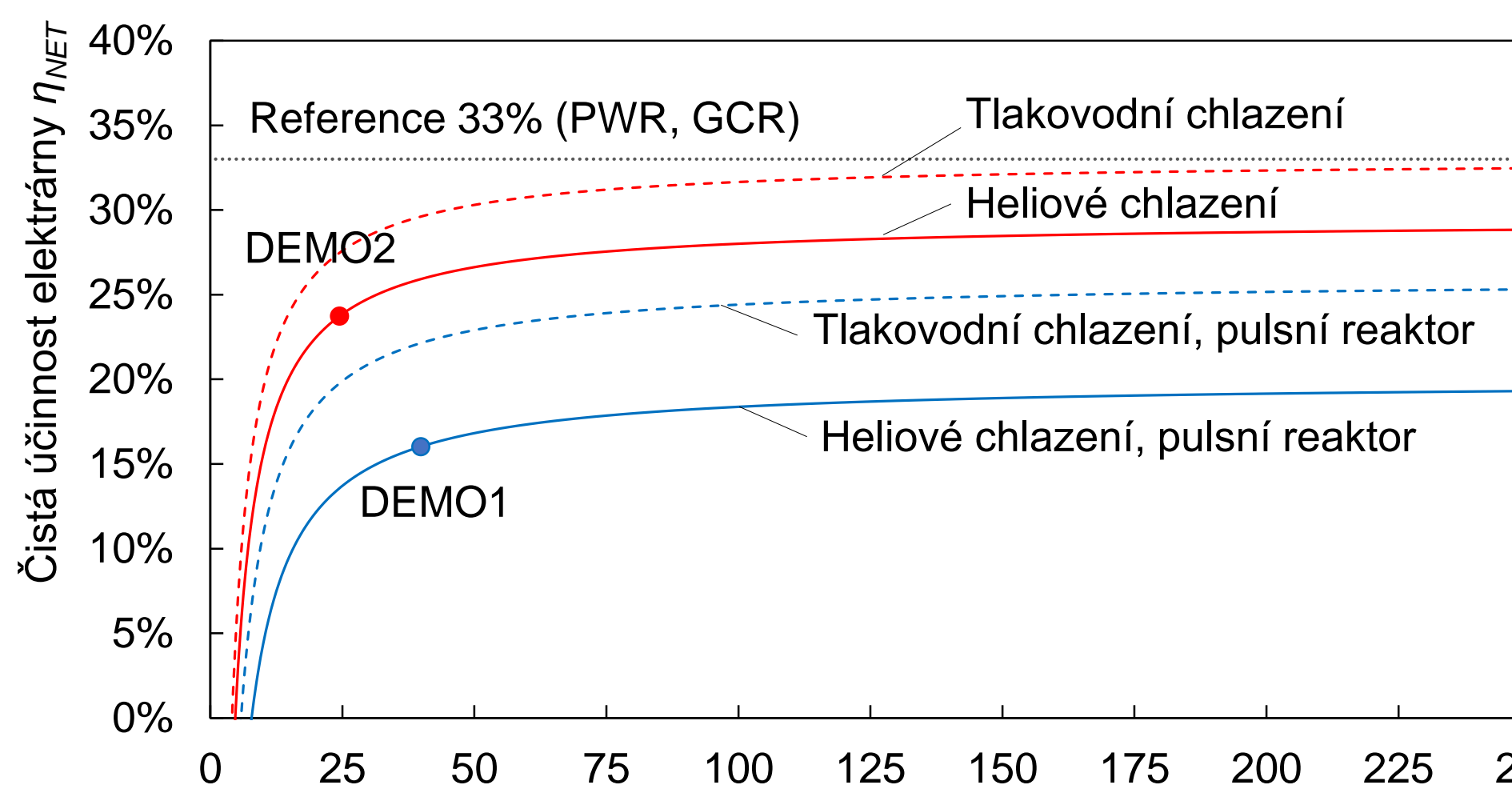


$$Q = \frac{P_F}{P_H}$$

$$M_R = \frac{P_F + P_B - P_{LR}}{P_F}$$

Ztráty i pokles čisté účinnosti byly analyticky popsány a odvozené rovnice byly verifikovány podle evropských referenčních modelů fúzní elektrárny DEMO. Analýza recirkulace výkonu ohřevu ukázala, že přínos recirkulace výkonu ke kompenzaci spotřeby systému ohřevu bude přímo úměrný reciproké hodnotě faktoru zesílení reaktoru Q.

Bylo ukázáno, že vedlejšími důsledkem recirkulace výkonu ohřevu je narušení konzistence čisté účinnosti fúzních elektráren vztahené k tepelnému výkonu reaktoru. Čistá účinnost fúzních elektráren musí být vztahována k výkonu uvolňovanému v reaktoru tvořícímu pouze část celkového tepelného výkonu reaktoru.



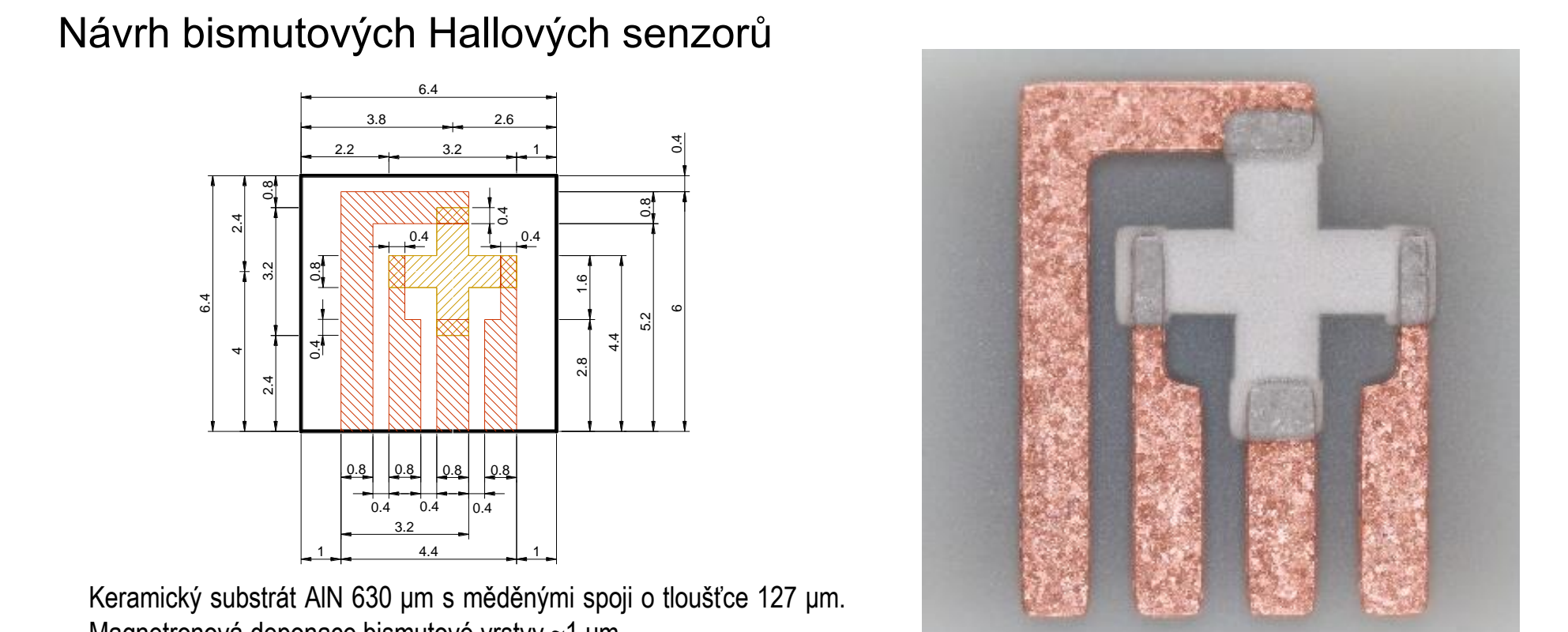
VÝVOJ PROTOTYPU RADIAČNĚ A TEPLOTNĚ ODOLNÝCH HALLOVÝCH SENZORŮ

Fúzní elektrárny budou vyžadovat měření ustáleného magnetického pole v prostředí vysokých teplotních a neutronových toků, pro které nejsou dostupné senzory vhodné. Klíčovým výsledkem experimentální části práce je funkční prototyp radiačně a teplotně odolných Hallových senzorů pro měření ustáleného magnetického pole termojaderného reaktoru ITER.

Senzory budou rozmístěny na vnějším povrchu vakuové komory reaktoru a budou se podílet na měření proudu v plazmatu, lokální proudové hustoty, polohy plazmatu a identifikaci MHD nestabilit magnetických povrchů. Pracovní teplota senzorů bude 100 °C, při vypékání reaktoru stoupne jejich teplota až na 220 °C. Za dobu provozu reaktoru budou exponovány celkovou neutronovou fluencí 1,3x10²² n/m².

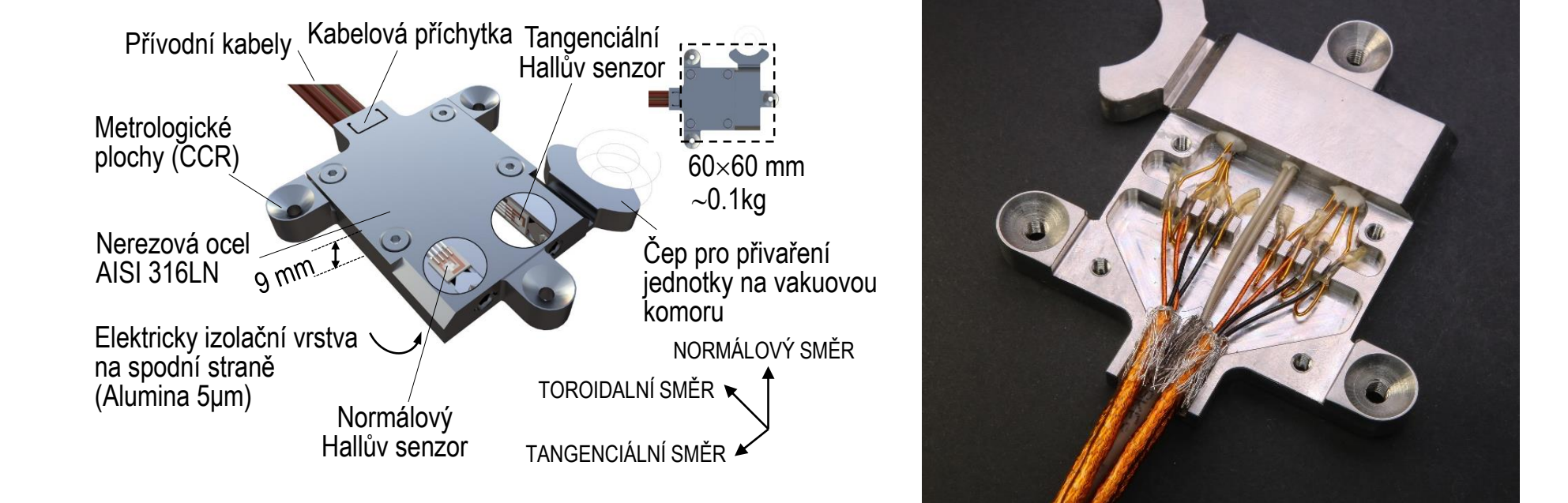
Vyvinutý prototyp úspěšně prošel testováním a byl následně schválen mezinárodní odbornou komisí ITER pro použití v reaktoru ITER.

Na základě vyvinutého prototypu byla zahájena výroba senzorů. Instalace senzorů na reaktor ITER bude probíhat od roku 2020.



Návrh bismutových Hallových senzorů
Keramický substrát AlN 630 μm s měděnými spoji o tloušťce 127 μm. Magnetronová deponace bismutové vrstvy ~1 μm.

Technologie výroby a charakterizace senzorů



Vyhodnocovací jednotka senzorů
Synchronní detekce a proudová rotace

ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů vývoje jaderné energetiky jsou vysoce bezpečné jaderné reaktory. Dalšími cíli jsou zvýšení energetického potenciálu omezených zásob paliva a snížení množství produkovaného radioaktivního odpadu. Fúzní reaktory budou využívat stejný zdroj energie jako štěpné reaktory – vazebnou energii atomových jader. Přitom ale nabídnou plnou vnitřní jadernou bezpečnost bránící nekontrolované jaderné reakci. Nabídnou také prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva a omezí jaderný odpad pouze na sekundárně aktivovanou konstrukci reaktoru z nízkoaktivovatelných materiálů.

Z porovnání uvedených cílů vývoje jaderné energetiky a vlastností fúzních reaktorů je patrné, že se shodují. Fúzní reaktory v tomto smyslu představují další vývojový stupeň jaderných reaktorů, generaci V. Jejich odlišná technická konstrukce umožňuje vyřešit fundamentální omezení štěpných reaktorů a dosáhnout stanovených cílů vývoje jaderné energetiky.