

Přehled současného stavu projektů MMR ve světě

26.5.2021, Ing. Lubor Žežula

Webinář MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY



Projekt TK03010119 Uplatnitelnost malých a středních jaderných reaktorů v energetice ČR
je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THETA

 **Skupina ÚJV**
LIDÉ | INOVACE | TECHNOLOGIE

Definice malých reaktorů

- **Malé modulární reaktory (Small Modular Reactors - SMR) jsou definovány jako jaderné reaktory lehkovodního typu (LWR designs) do výkonu 300 MWe (např. NuScale).**
- **Pokročilé reaktory (Advanced Reactors) jsou definovány jako malé jaderné reaktory nelehkovodního typu (non-LWR designs) (např. Natrium Reactor)**
- **Použité technologie umožňují instalovat veškeré jejich zařízení do modulů, které se dají kompletovat v továrnách, což přináší výhody plynoucí ze sériové výroby a krátké stavební doby.**
- **Rozlišují se dva typy modulů a to:**
 - modul ve významu jaderného ostrova s malým reaktorem, kterých je možné postavit v dané lokalitě několik vedle sebe (např. NuScale Power Module™) nebo
 - modul ve významu kompaktního „boxu“, který je kompletně vyroben v továrně a po přivezení do lokality je „ihned“ schopen provozu (např. U-Battery).

Definice malých reaktorů

- **Mikroreaktor / mikro modulární reaktor je - velmi malý jaderný reaktor, obvykle s tepelným výkonem od 2 MWt do 40 MWt,**
- **Většina z těchto malých reaktorů je navržena tak, aby byla „přenosná“ – řada z nich by mohla být dopravována jako kamionový návěs.**

MMR – Stav vývoje a možnosti uplatnění

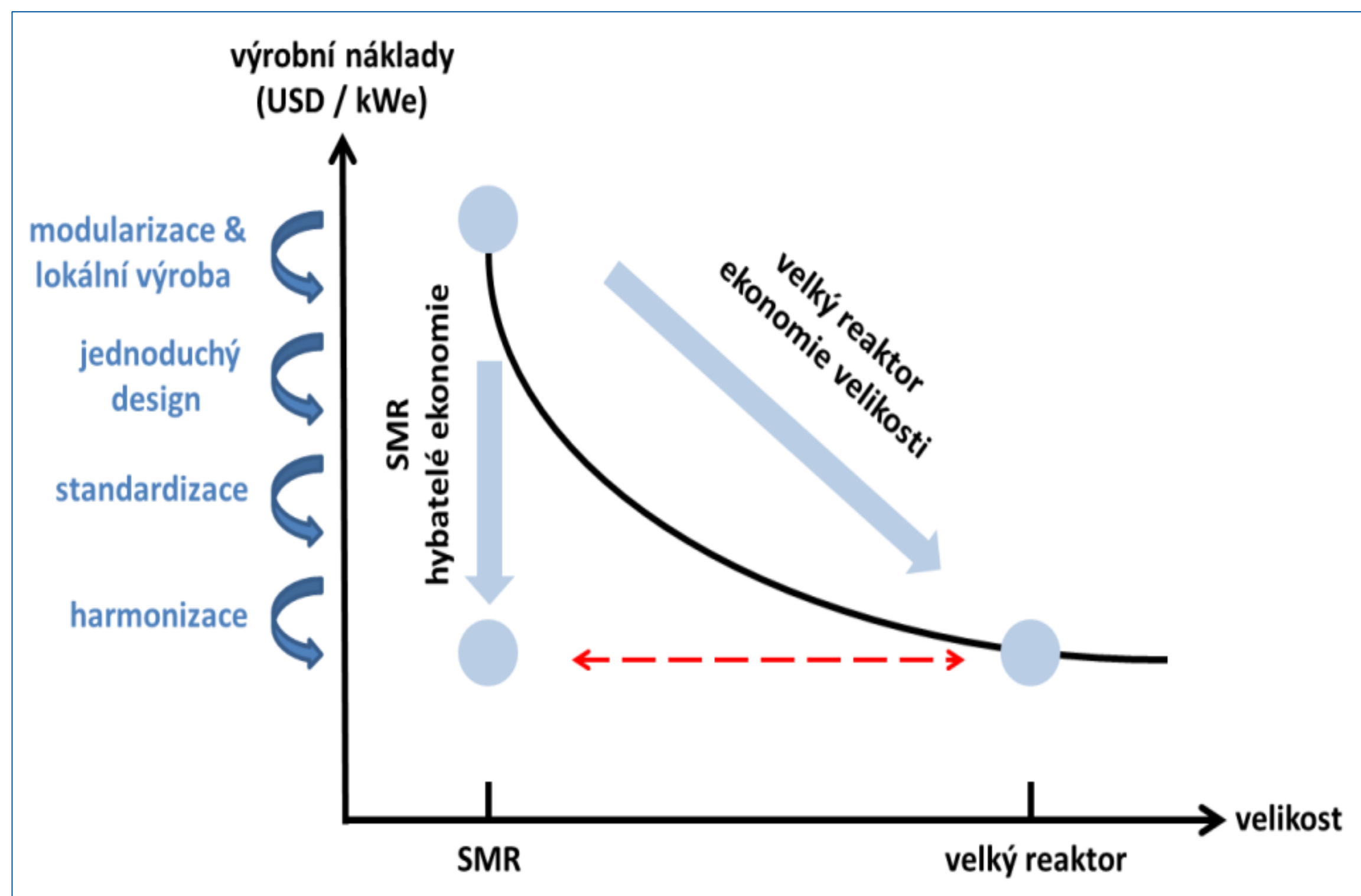
- Modulární koncepce tak umožňuje flexibilní rozšiřování kapacity podle lokálních potřeb, malé modulární reaktory mohou být postaveny samostatně nebo jako moduly ve větším energetickém celku.
- Předpokládá se, že MMR dosáhnou úspory z „economy of scale“ z důvodu počtu postavených reaktorů.
 - Malé jednotky jsou považovány za mnohem zvládnutelnější investice pro elektrárenské společnosti než výstavba velkých energetických reaktorů.
- V současné době jak ve světě, tak v Evropě (včetně ČR) probíhají práce na vývoji technologií malých modulárních reaktorů (více než 70 návrhů koncepcí).
- Velká většina projektů se nachází pouze ve fázi „preconceptual design“ nebo „conceptual design“.
- Málo projektů se nachází ve fázi „basic design“ s výhledem na reálnou realizaci.

MMR – Stav vývoje a možnosti uplatnění

- Řada projektů je pozastavena nebo zrušena z ekonomických důvodů (např. mPower), tento proces probíhá značně nepředvídatelně.
- V nejpokročilejší fázi vývoje jsou jaderné elektrárny tlakovodního typu Generace III+ s malými modulárními reaktory o jednotkovém výkonu cca 20-300 MWt.
 - Potenciál světového trhu s reaktory SMR k roku 2035 se odhaduje v rozsahu cca 65-85 GW.
- Malé modulární reaktory se mohou uplatnit pro výrobu elektřiny a jako zdroj tepla pro centrální zásobování teplem.
 - V podmínkách ČR nejdříve nasazeným typem by mohly být lehkovodní reaktory (lze realizovat dle stávající legislativy za podmínek platných pro velké reaktory, které ale zvyšují náklady na provoz SMR – chybí specifická legislativa pro licencování a provoz SMR v ČR).

MMR – Stav vývoje a možnosti uplatnění

Hybatelé ekonomie SMR, které kompenzují ekonomii velikosti velkého reaktoru



Zdroj: SMALL MODULAR REACTORS: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, NEA No. 7560, © OECD 2021

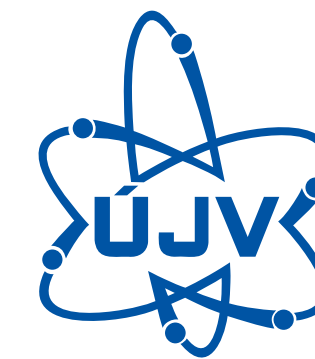
Reprezentativní přehled projektů MMR ve světě

Projekt	Výkon na modul (MWe)	Počet modulů	Typ	Projektant	Země	Status
Samostatné bloky LWR-SMRs						
CAREM	30	1	PWR	CNEA	Argentina	Under construction
SMART	100	1	PWR	KAERI	Korea	Certified design
ACP100	125	1	PWR	CNNC	Čína	Construction began in 2019
SMR-160	160	1	PWR	Holtec International	USA	Conceptual design
BWRX-300	300	1	BWR	GE Hitachi	USA - Japonsko	First topical reports submitted to the US NRC and to the CNSC as part of the licensing process
CANDU SMR	300	1	PHWR	SNC-Lavalin	Kanada	Conceptual design
UK SMR	450	1	PWR	Rolls Royce	Velká Británie	Conceptual design
Vícemodulové LWR-SMR						
NuScale	50	4 až 12	PWR	NuScale Power	USA	Certified design. US NRC design approval received in August 2020
RITM-200	50	2	PWR	OKBM Afrikantov	Rusko	Land-based nuclear power plant – conceptual design
Nuward	170	2 až 4	PWR	CEA/EDF/Naval Group/ TechnicAtome	Francie	Conceptual design
Mobilní SMRs						
ACPR50S	60	1	Floating PWR	CGN	Čína	Under construction
KLT-40S	35	2	Floating PWR	OKBM Afrikantov	Rusko	Commercial operation

Reprezentativní přehled projektů MMR ve světě

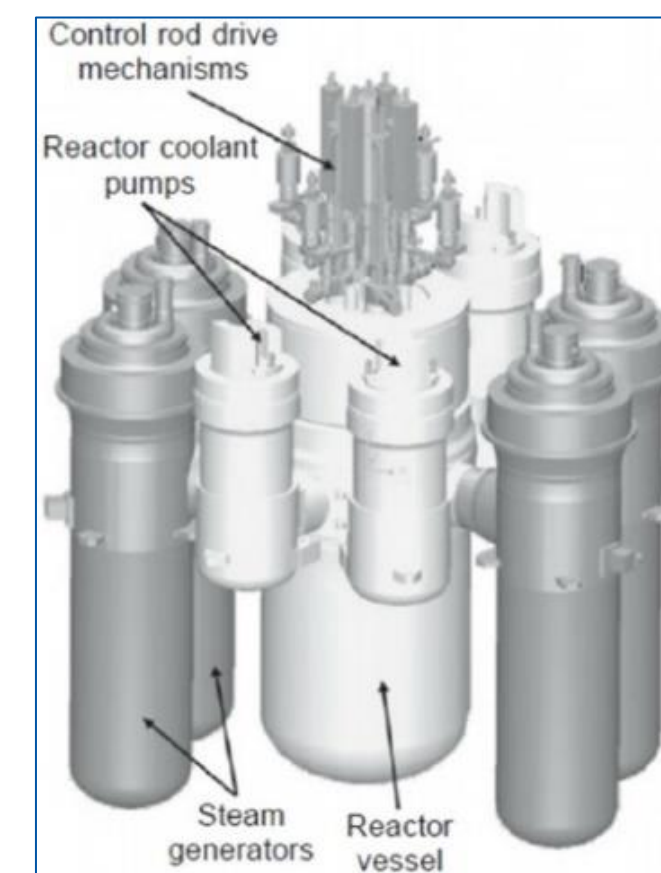
Projekt	Výkon na modul (MWe)	Počet modulů	Typ	Projektant	Země	Status
GEN IV SMRs						
Xe-100	80	1 až 4	HTGR	X-energy LLC	USA	Conceptual design
ARC-100	100	1	LMFR	Advanced Reactor Concepts LLC	Kanada	Conceptual design
KP-FHR	140	1	MSR	Kairos Power	USA	Pre-conceptual design
IMSR	190	1	MSR	Terrestrial Energy	Kanada	Basic design
HTR-PM	210	2	HTGR	China Huaneng/CNEC/Tsinghua University	Čína	Under construction
EM2	265	1	GMFR	General Atomics	USA	Conceptual design
Stable Salt Reactor	300	1	MSR	Moltex Energy	Velká Británie	Pre-conceptual design
Natrium	345	1	SFR	Terrapower/GE Hitachi	USA	Conceptual design
Westinghouse Lead Fast Reactor	450	1	LMFR	Westinghouse	USA	Conceptual design
MicroMR						
eVinci	0.2-5	1	Heat pipe reactor	Westinghouse	USA	Basic design
Aurora	2	1	LMFR	Oklo	USA	Licence application submitted to the US NRC
U-Battery	4	1	HTGR	Urenco and partners	Velká Británie	Basic design
MMR	5-10	1	HTGR	USNC	USA	Basic design

| Projekty MMR v provozu



KLT-40S

Plovoucí elektrárna „Akademik Lomonosov“ využívající dva tlakovodní reaktory KLT-40S o celkovém výkonu 300 MWt (70 MWe), Ruská federace. Projekt byl vyvinut firmou JSC “Afrikantov OKBM”. V r. 2019 byla platforma po moři přepravena do Peveku, kde byla 19. prosince připojena k síti a 22. května 2020 uvedena do komerčního provozu.

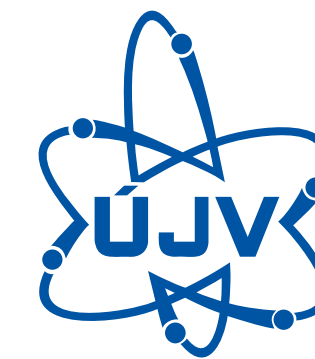


Zdroj:

https://rosatom.ru/en/press-centre/news/heat-from-a-floating-npp-was-first-delivered-to-the-city-heating-network-in-pevek/?sphrase_id=1894211

<http://fnpp.info/multimedia/gallery/peveks-christmas-tree-lit-by-akademik-lomonosov>

| Projekty MMR v realizaci



HTR-PM

Demonstrační elektrárna v lokalitě Shidaowan s dvěma vysokoteplotními reaktory HTR-PM o celkovém výkonu 2 x 250 MWt, Čína. Projekt byl vyvinut firmou CNNC. V současné době je ve fázi spouštění. V provozu má být tento rok (2021).

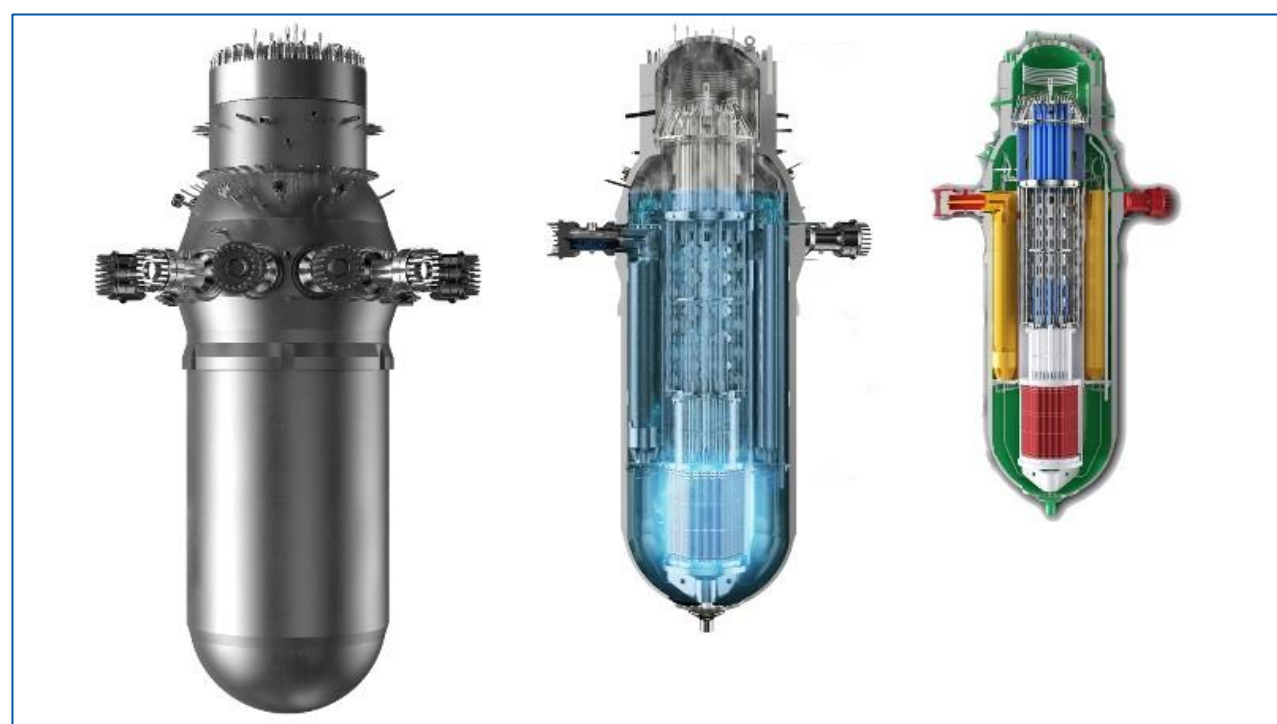


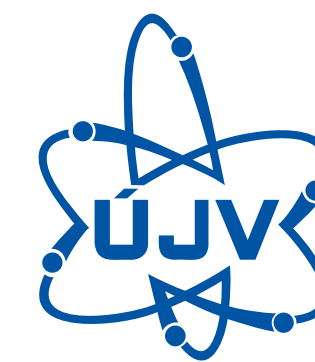
Zdroj: China National Nuclear Corporation (CNNC) /<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Cold-testing-of-HTR-PM-reactors-completed>

Zdroj: China National Nuclear Corporation (CNNC) /<https://www.neimagazine.com/news/newsfirst-fuel-shipped-to-chinas-htr-pm-project-8453226>

CAREM

Prototyp reaktoru CAREM25, modulární integrovaný tlakovodní reaktor o výkonu 100 MWt (34 MWe brutto) je ve výstavbě v lokalitě Atucha, Argentina. Projekt byl vyvinut CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica).





| Projekty MMR připraveny k realizaci

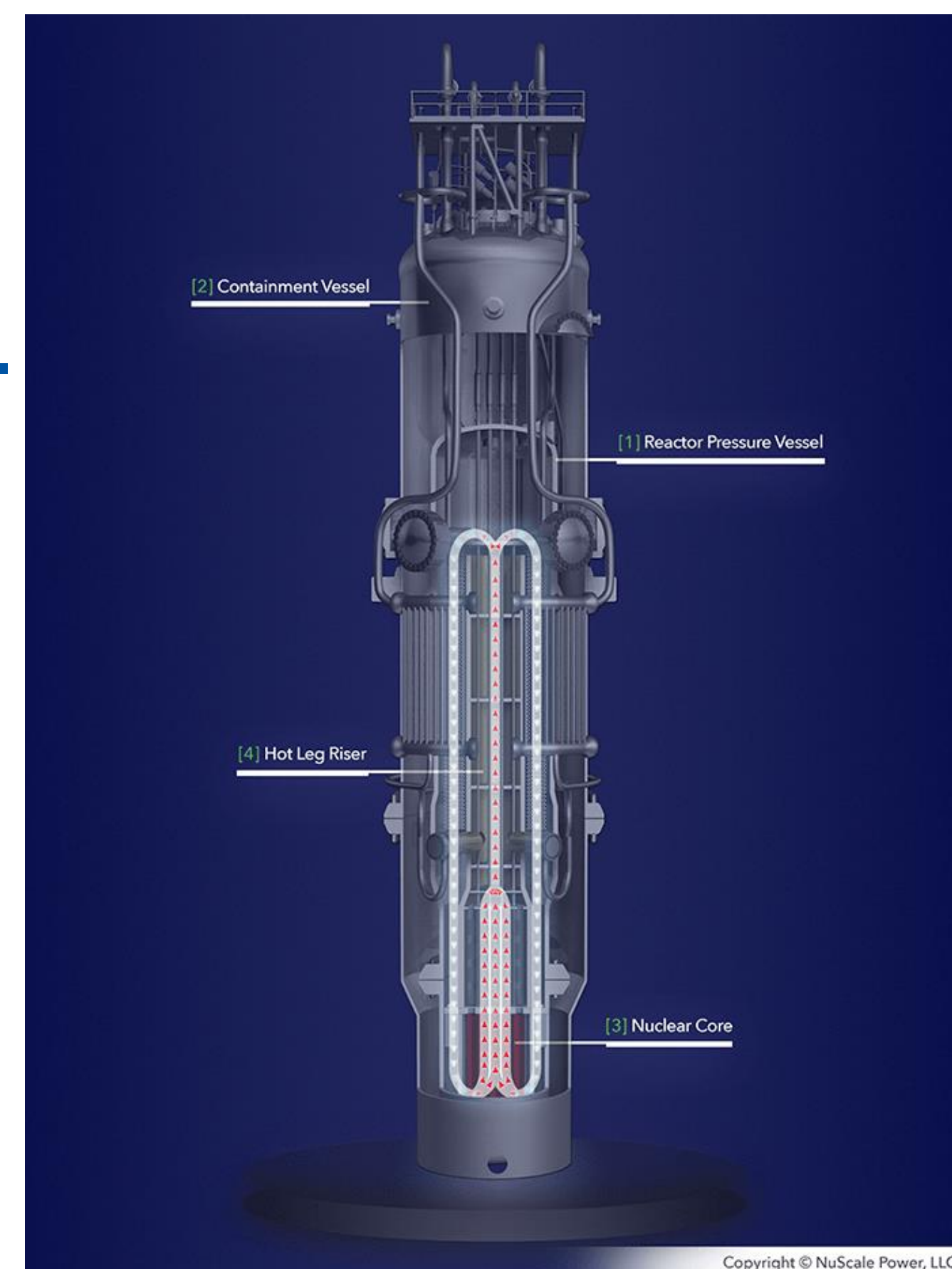
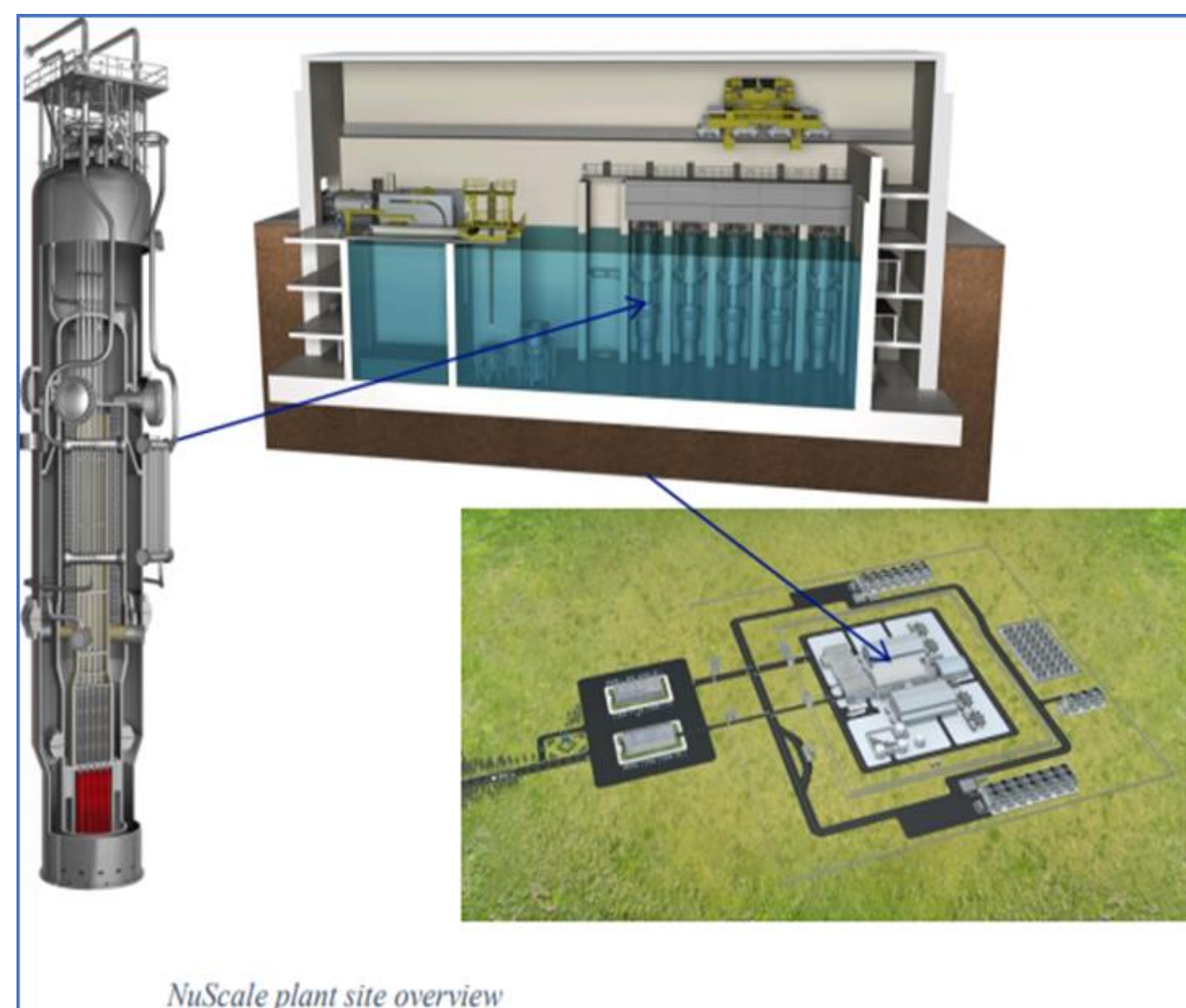


NuScale

Reaktor NuScale (NuScale Power Module™) má nominální výkon tepelný výkon 250 MWt a elektrický 77 MWe (brutto). Projekt byl vyvinut firmou NuScale Power, LLC., USA.

JE s reaktory NuScale může sestávat ze:

- čtyř modulů s celkovým výkonem 308 MWe,
- šesti modulů s celkovým výkonem 462 MWe,
- dvanácti modulů s celkovým výkonem 924 MWe.

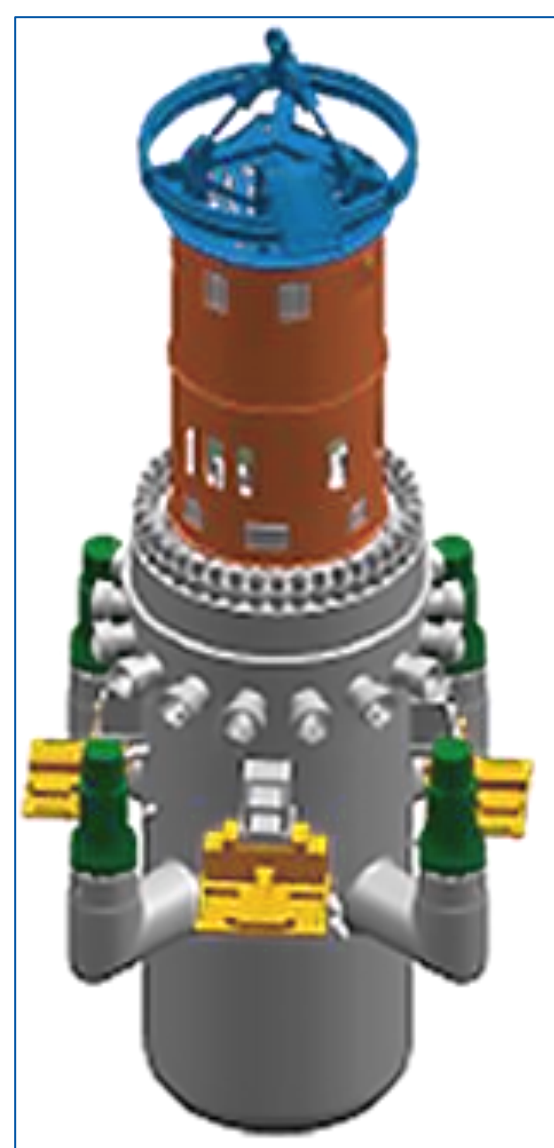
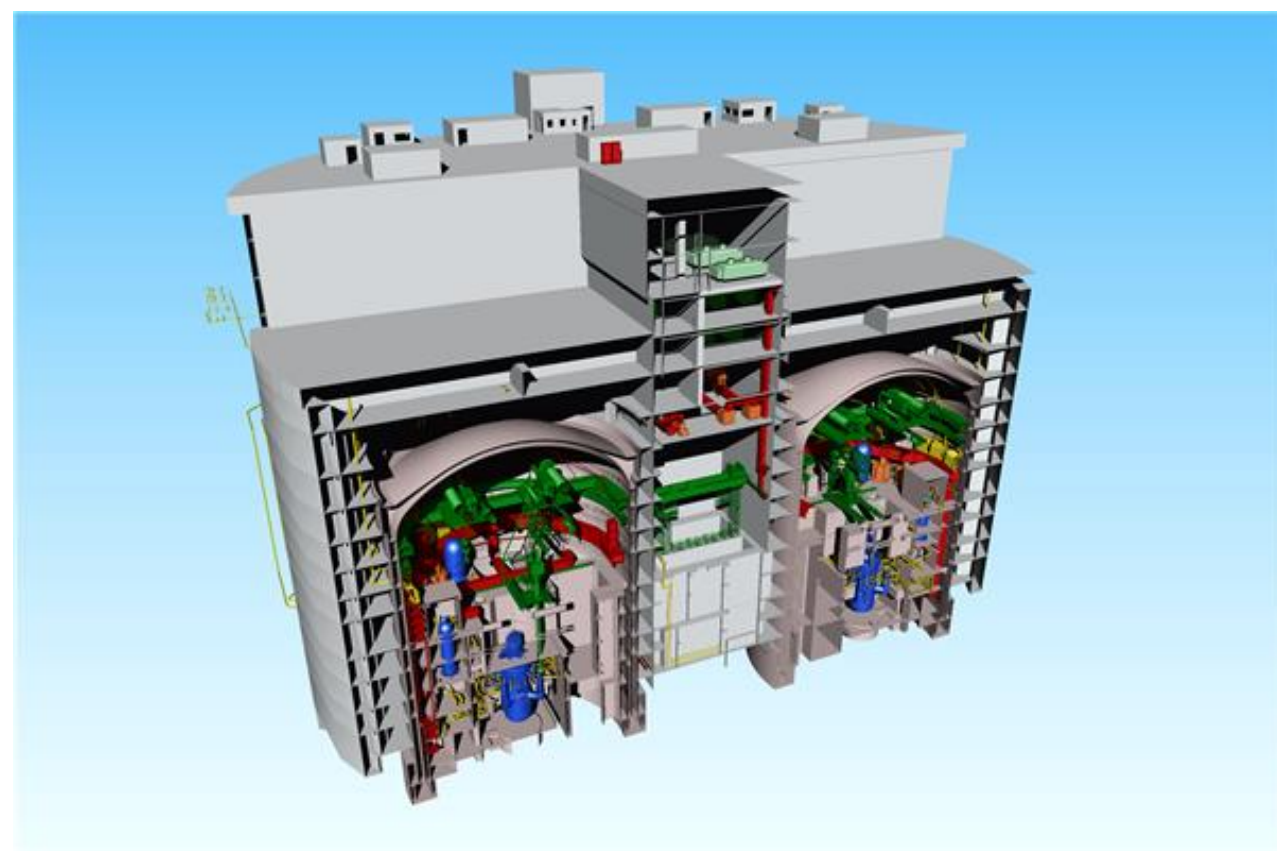


NuScale (pokr.)

- **US NRC v září 2020 vydala schválení standardního projektu (SDA – Standard Design Approval) pro verzi SMR NuScale 50 MWe na modul**
- **Předpoklad podání žádosti Standard Design Approval pro verzi s výkonem 77 MWe - NuScale NPM-20, ve 4. čtvrtletí roku 2022.**
- **Společnosti Fluor, NuScale Power a Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) připravují v Idaho Nuclear Laboratory (INL) výstavbu demonstrační JE s výkonem 720 MWe - zahájení v r. 2023, očekávané dokončení a spuštění prvního modulu v r. 2029, další v roce 2030**

ACP100

Reaktor ACP100 je tlakovodní reaktor o výkonu 385 MWt a 125 MWe a je vyvinut z většího PWR reaktoru. Projekt byl vyvinut firmou CNNC. ACP100 byl identifikován jako „klíčový projekt“ v dvanáctém pětiletém plánu Číny. Zahájení výstavby bylo oznámeno v roce 2019 s přepokládaným „prvním litím betonu“ v roce 2021 v lokalitě Changjiang v Číně.

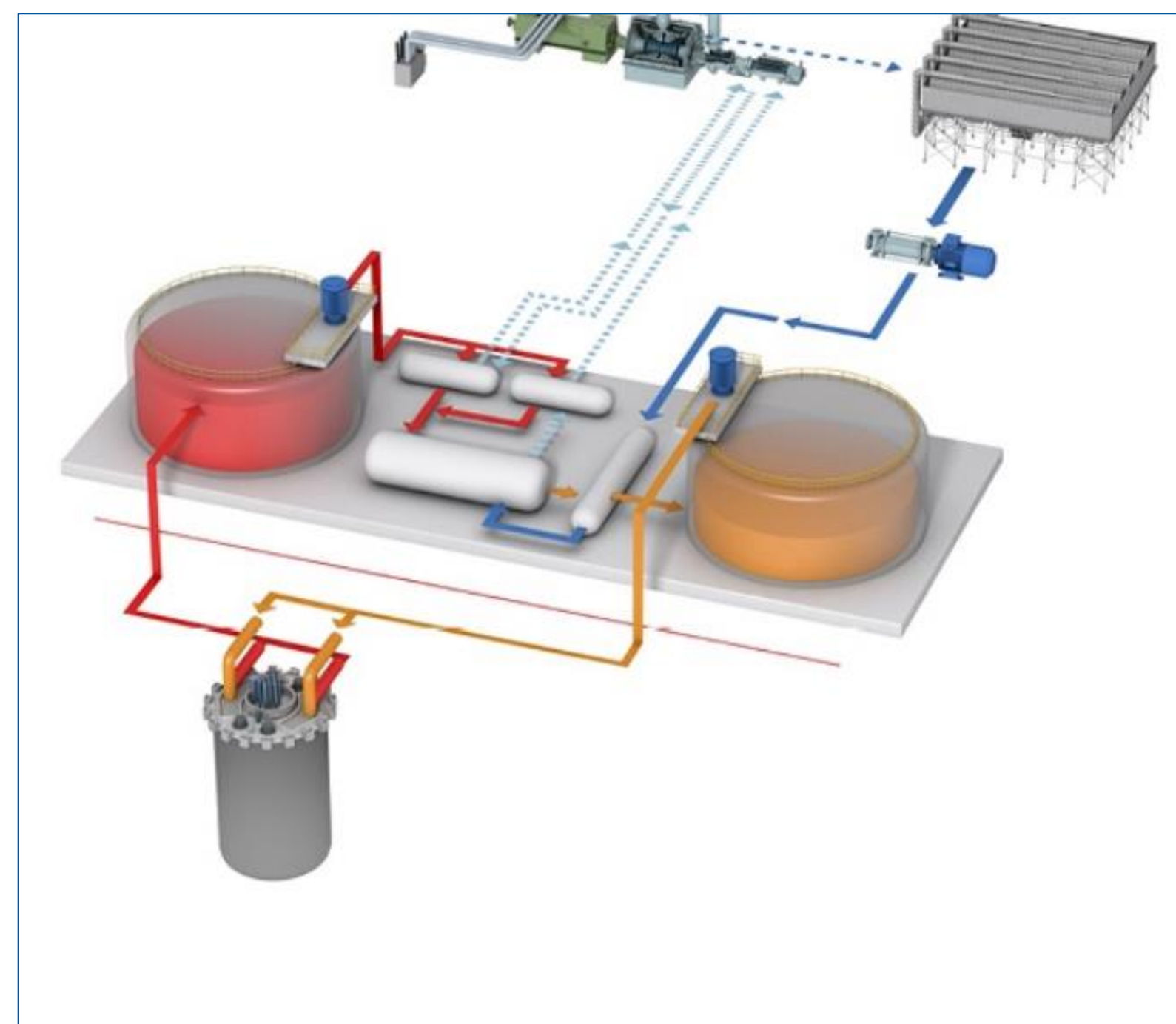
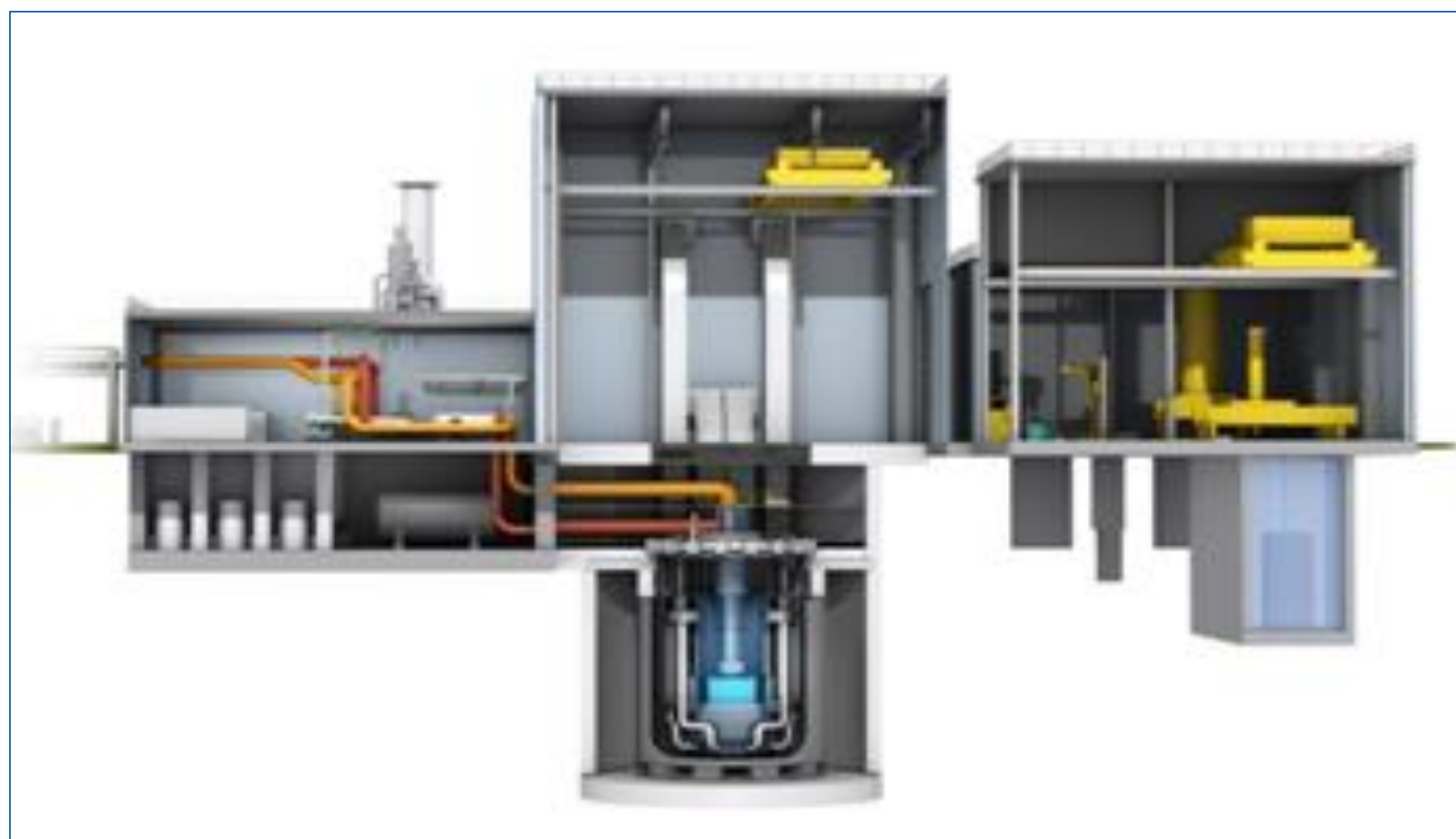


Natrium

- **Reaktor Natrium™ (Natrium™ Reactor and Integrated Energy Storage) má**
 - **nominální výkon tepelný výkon 1100 MWt**
 - **elektrický 345 MWe (brutto)**
 - **úložiště energie může v případě požadavku sítě zvýšit výkon systému na 500 MWe po dobu delší než pět a půl hodiny.**
- **Projekt byl vyvinut firmami TerraPower a Hitachi, USA.**
- **Projekt byl vybrán americkým ministerstvem energetiky (US DOE) v rámci programu Advanced Reactor Demonstration Programme (ARDP) k podpoře realizace demonstračního sodíkem chlazeného reaktoru a energetického systému Natrium™ s jadernou technologií GE Hitachi.**

Natrium (pokr.)

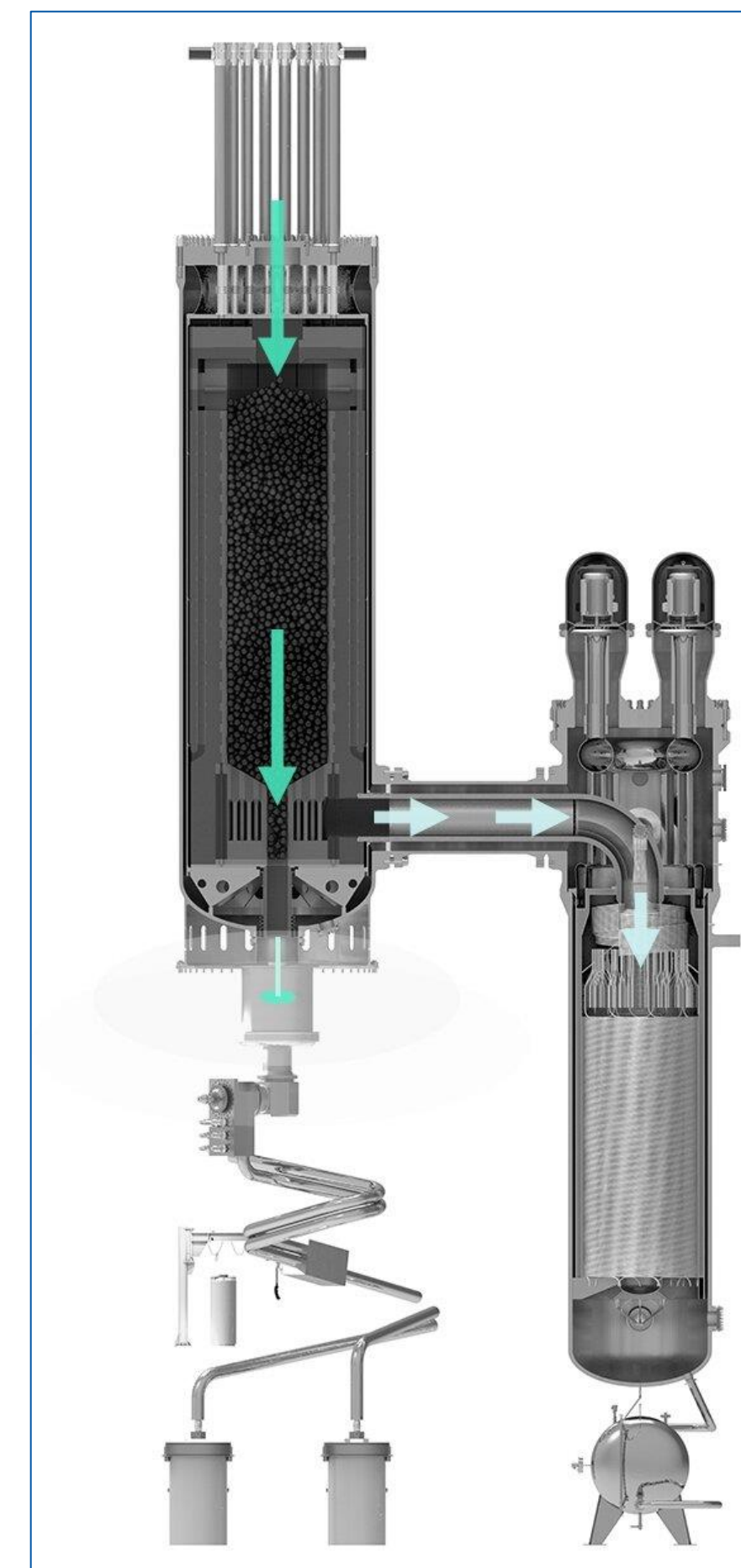
- Projekt obdržel ze strany US DOE v roce 2020 podporu 15 milionů USD a může obdržet celkově od 400 mil. do 4 mld. USD v příštích 5 až 7 letech).
- Podpora je určena na vybudování demonstrační elektrárny, která bude spuštěna do sedmi let.



Zdroj: <https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>

Xe-100

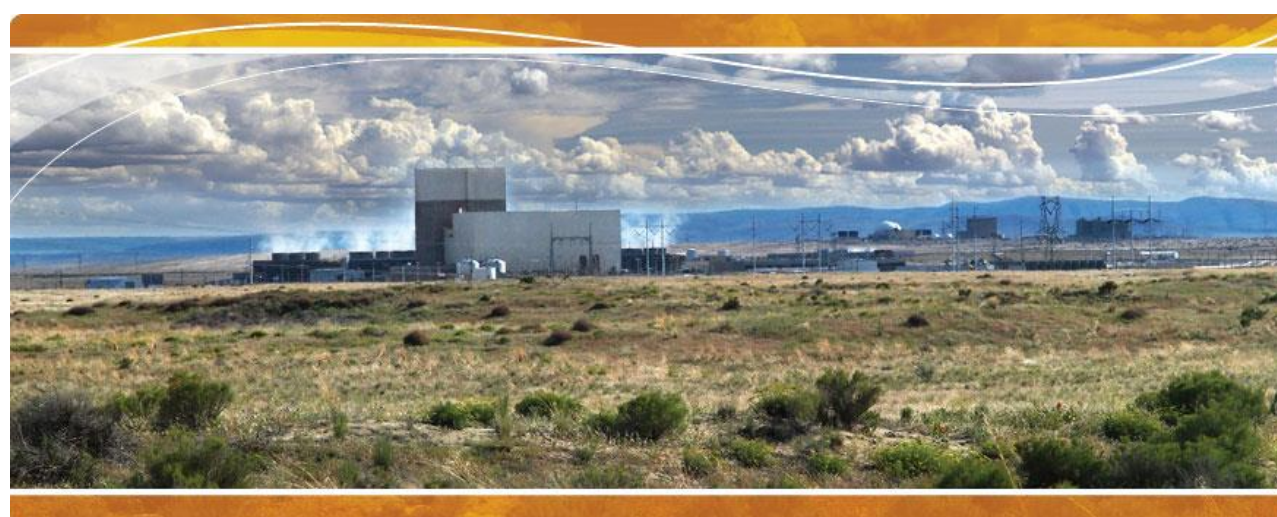
- **Vysokoteplotní reaktor Xe-100 má**
 - **nominální výkon tepelný výkon 200 MWt**
 - **elektrický 82,5 MWe (brutto).**
- **Projekt byl vyvinut firmou X-energy, USA.**
- **Společnost X-energy byla vybrána americkým ministerstvem energetiky (US DOE) v rámci programu Advanced Reactor Demonstration Programme (ARDP) k realizaci projektu reaktoru Xe-100.**
 - **Projekt obdržel ze strany US DOE v roce 2020 podporu 15 milionů USD a může obdržet celkově od 400 mil. do 4 mld. USD v příštích 5 až 7 letech.**
 - **Podpora je určena na vybudování demonstrační elektrárny, která bude funkční do sedmi let. X-energy dodá komerční čtyřblokovou elektrárnu založenou na vysokoteplotním plynem chlazeném reaktoru Xe-100.**



Zdroj: <https://x-energy.com/reactors/xe-100>

Xe-100 (pokr.)

- Reaktor Xe-100 umožňuje zajištění flexibilního elektrického výkonu i procesního tepla pro širokou škálu aplikací průmyslového tepla, jako je odsolování a výroba vodíku, Součástí projektu je dodávka zařízení na výrobu paliva TRISO v komerčním měřítku.
- Společnost X-energy předpokládá v r. 2021 dokončení projektové dokumentace (Basic Design) a předložení žádosti o certifikaci US NRC a v r. 2025 zahájení výstavby.
 - TRi Energy Partnership (Energy Northwest, Grant County Public Utility District and X-energy)
 - existující lokalita Energy Northwest u Richlandu



Zdroj: <https://www.energy-northwest.com/energyprojects/Columbia/Pages/default.aspx>



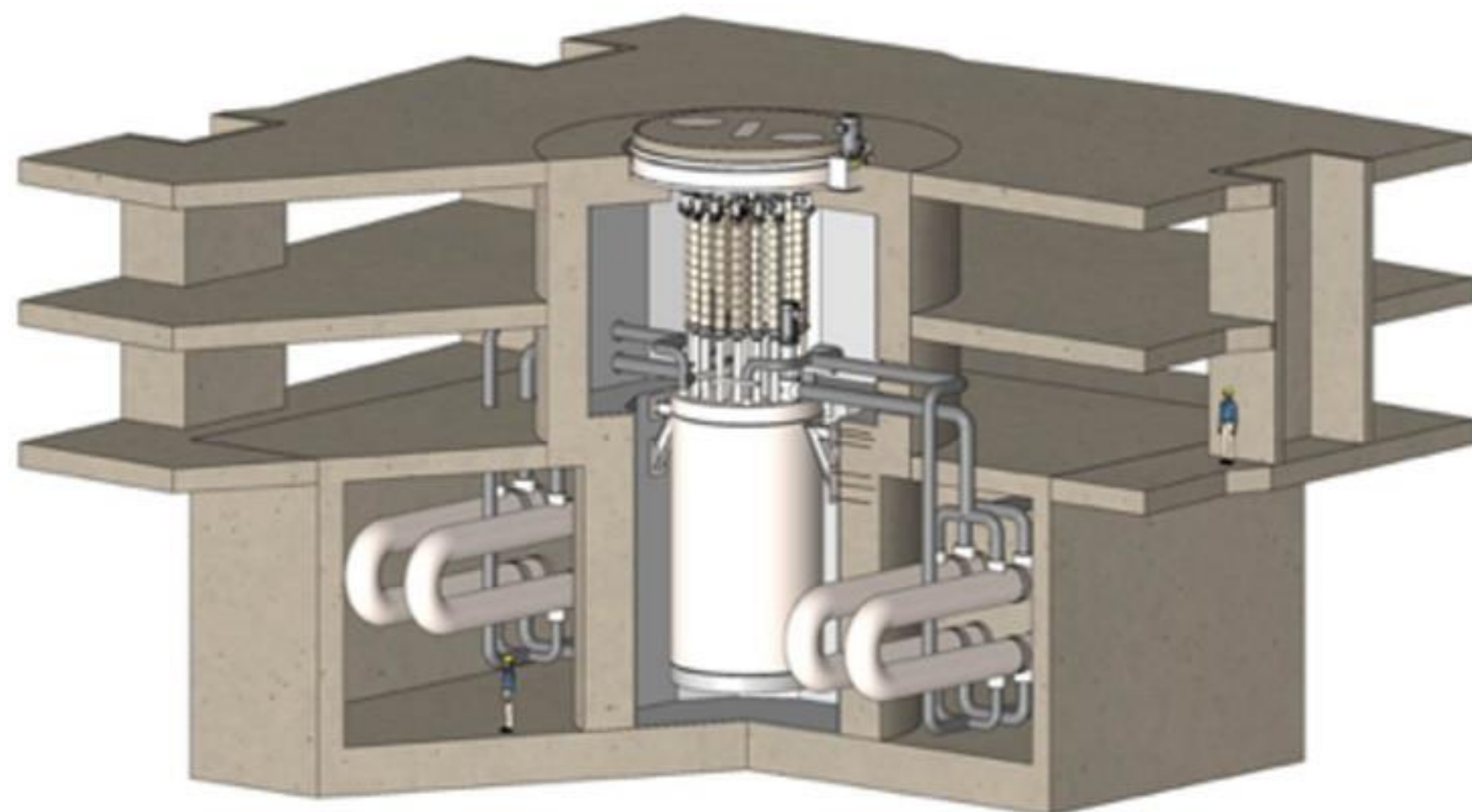
Zdroj: <https://x-energy.com/reactors/xe-100>

Hermes

- Reaktor Hermes Reduced-Scale Test Reactor (dříve Kairos Power Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor (KP-FHR)) má
 - nominální tepelný výkon 280 MWt
 - elektrický výkon 140 MWe (brutto)
- Projekt byl vyvinut firmou Kairos Power , USA.
- Projekt byl vybrána americkým ministerstvem energetiky (US DOE) k podpoře vývoje demonstračního roztavenými solemi chlazeného reaktoru Hermes v rámci Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP).
 - Projekt obdržel ze strany US DOE v roce 2020 podporu 30 milionů USD a celkově může obdržet 629 mil. USD v příštích 6 letech.
 - Podpora je určena pro vývoj bezpečné a cenově dostupné technologie reaktorů, které lze licencovat a nasadit v průběhu příštích 10 až 14 let

Hermes (pokr.)

- Kairos Power a Tennessee Valley Authority (TVA) oznámily 6.5.2021 záměr realizace tohoto reaktoru v lokalitě East Tennessee Technology Park (ETTP) v Oak Ridge, Tennessee.



Zdroj: TVA and Kairos Power to collaborate on demonstration reactor : New Nuclear - World Nuclear News (world-nuclear-news.org)

Zdroj: https://kairopower.com/external_updates/kairos-power-and-tva-to-collaborate-on-low-power-demonstration-reactor/

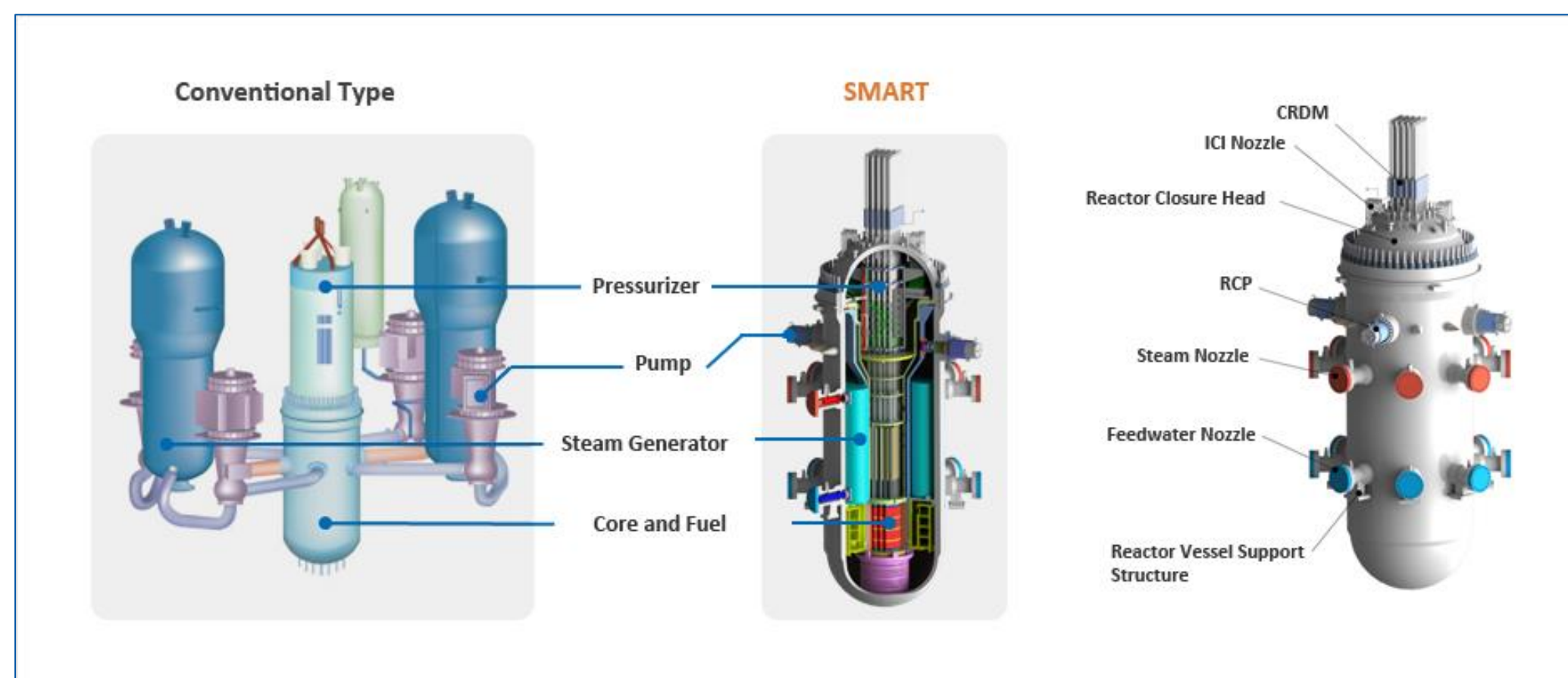
Micro Modular Reactor (MMR™)

- Společnost Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC) vyvíjí mikro-modulární reaktor (MMR™ ENERGY) s tepelným výkonem 15 MWt a s čistým elektrickým výkonem přibližně 5 MW.
- Společnost Global First Power Ltd. (společný podnik USNC a Ontario Power Generation) v listopadu 2020 podepsala dohodu s Canadian Nuclear Laboratories, CNL o podpoře projektu MMR, který bude umístěn v lokalitě CNL v Chalk River, vlastněných společnostmi Atomic Energy of Canada Limited (AECL) a spravovaných CNL.
- Zahájení výstavby je plánováno na rok 2021 a uvedení do provozu v roce 2026.



SMART

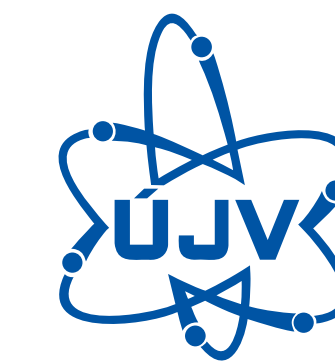
- Společnost SMART Power Co., Ltd. (Korea) nabízí na světovém trhu reaktor SMART - tlakovodní reaktor s integrovanými parními generátory a pokročilými bezpečnostními prvky o výkonu 330 MWt (100 Mwe).
- Projekt v roce 2012 získal od korejského regulátora certifikaci „Standard design approval“ (SDA).



Zdroj: <http://smart-nuclear.com/project/commercial.php>

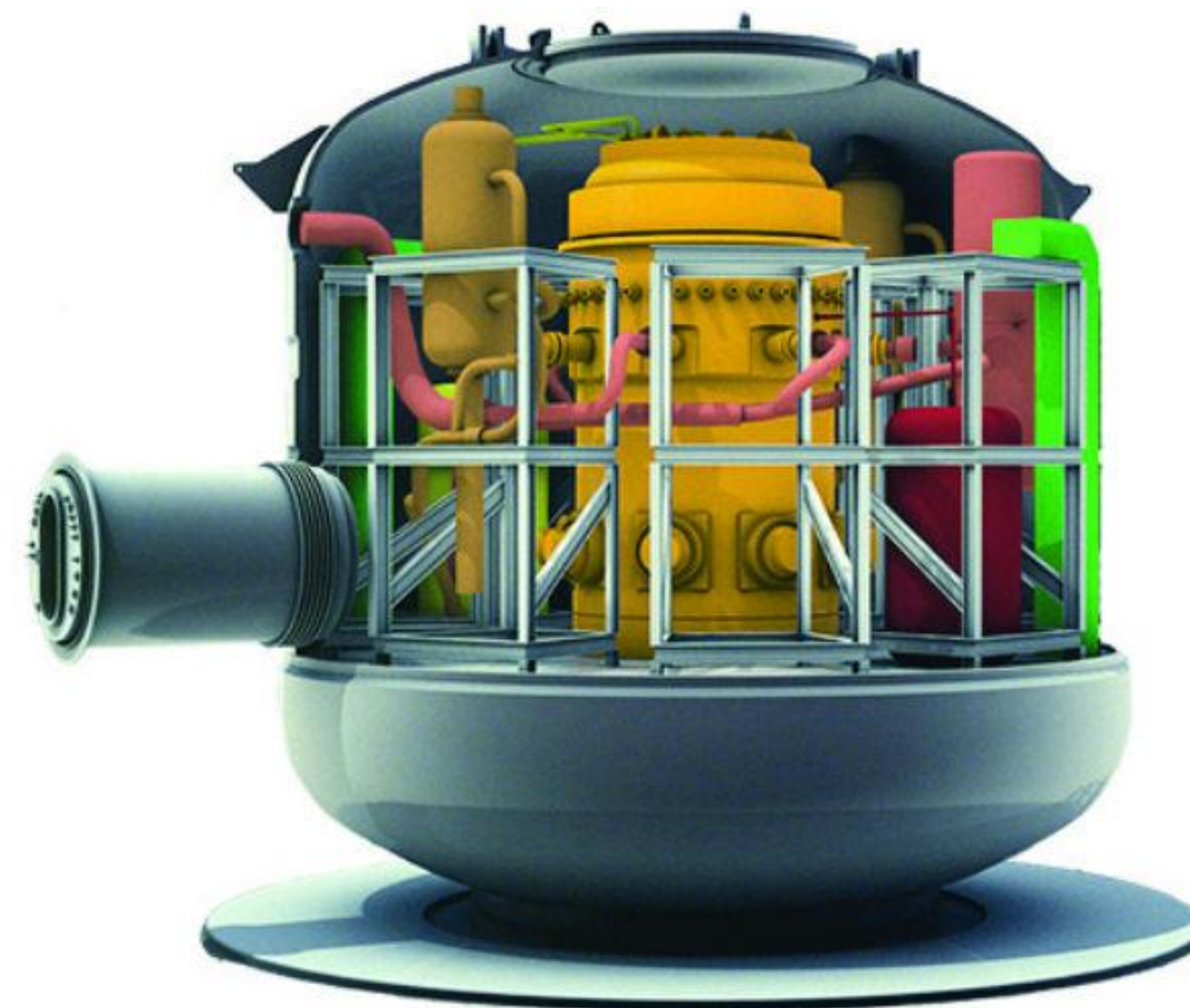


| Projekty MMR ve vývoji



NUWARD

- Reaktor NUWARD má nominální výkon tepelný výkon cca 500 MWt a elektrický 170 MWe (brutto).
- Jaderné zařízení s reaktorem NUWARD lze zařadit do generace III+ tlakovodních (PWR) systémů. Zařízení, tj. jaderná elektrárna (JE) je projektována s elektrickým výkonem 340 MWe se dvěma nezávislými reaktory po 170 MWe, které umožňují flexibilní provoz.
- Projekt vyvíjí konzorcium CEA, EDF, Naval Group and TechnicAtome
- Rámcová smlouva o možné spolupráci na vývoji reaktoru byla podepsána v září 2019 mezi firmami Westinghouse, EDF & CEA

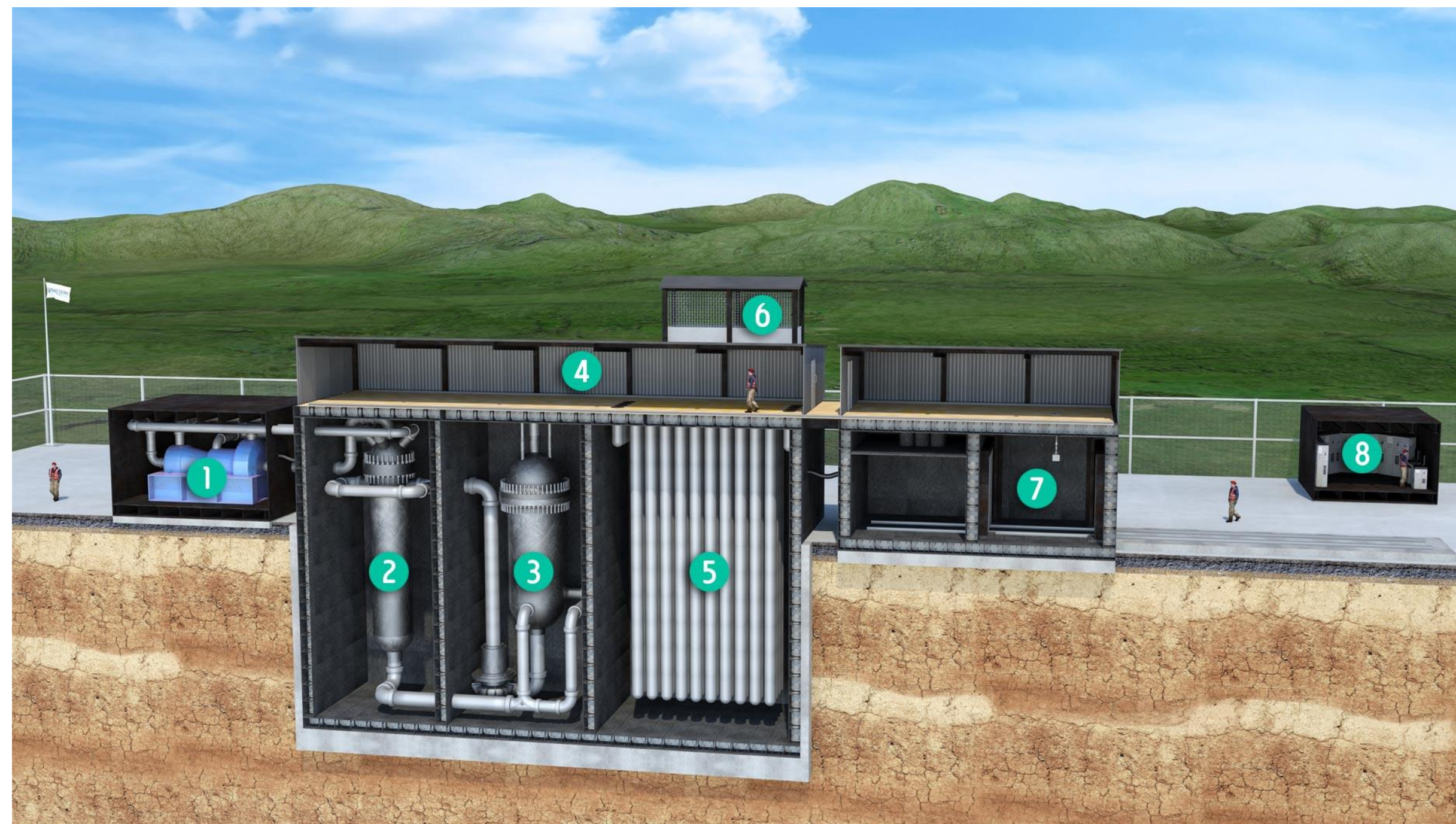


Zdroj: <https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>

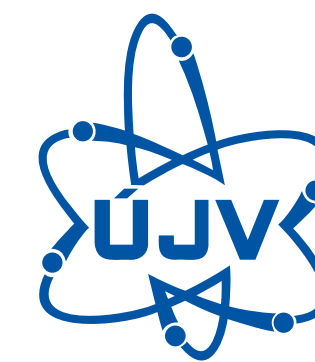
U-Battery

U-Battery Single Power Unit je projekt malého modulárního vysokoteplotního reaktoru chlazeného plynem (He) s tepelným výkonem 10 MWt a elektrickým výkonem 4 MWe. Je schopen dodávat procesní teplo o teplotě 750 °C. Projekt vyvíjí firma U-Battery Limited.

1. Turbogenerátor
2. Tepelný výměník
3. Reaktor
4. Podlaží údržby
5. Sklad použitého paliva (SPP)
6. Ventilace SPP
7. Palivové hospodářství
8. Blokova dozorna



Zdroj: <https://www.u-battery.com/design-and-technology>

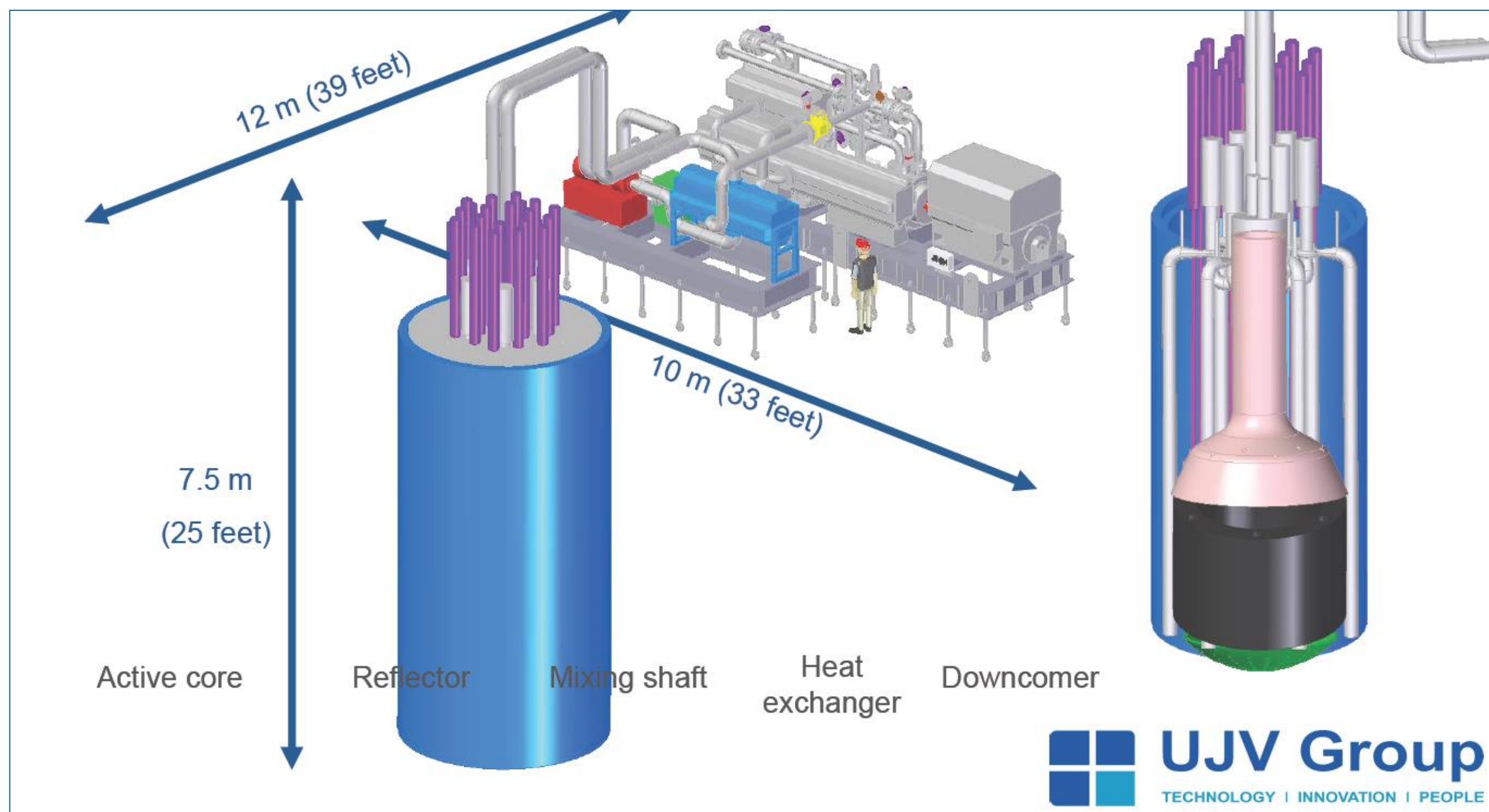


| Projekty MMR ve vývoji v ČR



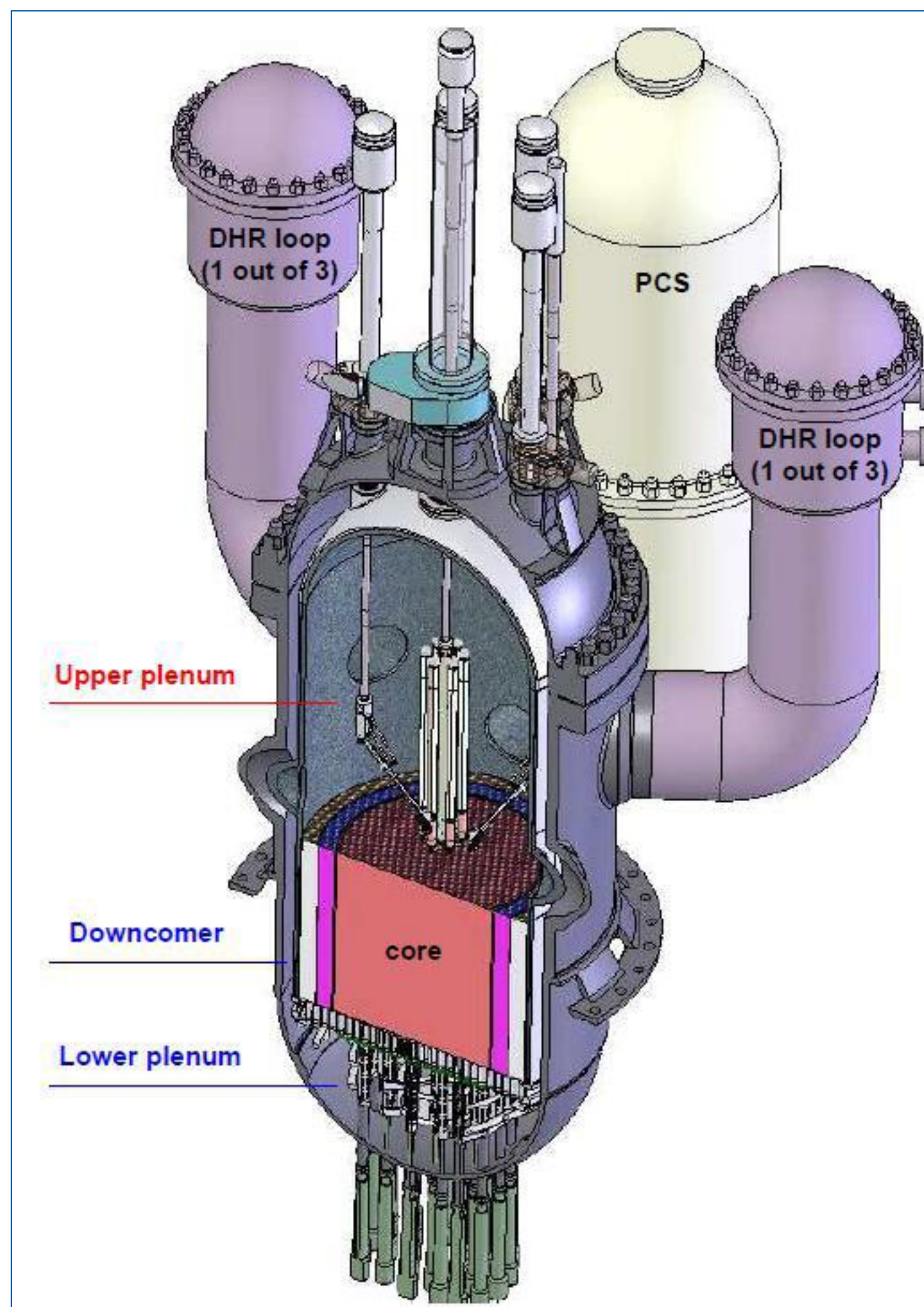
Energy Well

Projekt Energy Well je vyvíjený v rámci UJV Group. Koncept Energy Well představuje návrh malého modulárního vysokoteplotního reaktoru s nízkým výkonem kolem 20 MWt, chlazeného tekutými solemi.



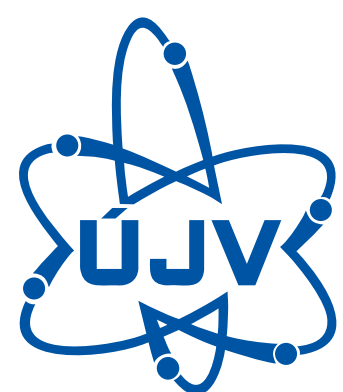
ALLEGRO / HeFASTo

- Projekt vývoje experimentálního reaktoru typu GFR (Gas Cooled Fast Reactor) charakterizovaný využitím rychlých neutronů a uzavřeným palivovým cyklem a použitím helia jako chladiva o výkonu 75 MWt.
- Technologie GFR je jednou z technologií podporovaných organizací European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII).
- V současné době se vývojem reaktoru GFR v rámci Evropské unie zabývá mezinárodní konsorcium V4G Centre of Excellence.
- Řádným členem tohoto sdružení jsou: ÚJV Řež, a. s. z ČR, VUJE, a. s. ze Slovenska, EK z Maďarska, NCBJ z Polska a přidruženými členy jsou CEA z Francie a Centrum výzkumu Řež z ČR.



Děkuji za pozornost

lubor.zezula@ujv.cz



ÚJV Řež, a. s.
Hlavní 130, Řež
250 68 Husinec, Czech Republic

e-mail: sales@ujv.cz
www.ujv.cz

