

Malé modulární reaktory

Mgr. Tereza Stašáková

427280@mail.muni.cz

Jádro zvolna zelená. Rolls-Royce získal miliardy na vývoj malých jaderných reaktorů

Kde se nacházíte: [iROZHLAS.cz](#) / [Věda a technologie](#) / [Technologie](#) | Související témata: [Interview Plus](#) [vědec](#) [jaderná energetika](#) [jaderná energie](#) [reaktor](#) [modulární](#) [jaderný reaktor](#) [jaderný reaktor](#) [vývoj](#)

Modulární jaderné reaktory můžete sekat jako Baťa cvičky, tvrdí vedoucí výzkumu v Řeži. Ale tak za 20 let

Nový jaderný blok bude, ujistil nedávno ministr průmyslu a vicepremiér Karel Havlíček za hnutí ANO. Opravdu ale Česko potřebuje velký jaderný reaktor, nebo dokonce dva? Nestačilo by několik menších, na kterých pracují inženýři v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži?



ČEZ bude s Američany vyvíjet modulární reaktory, podle Babiše jsou řešením pro energii z jádra v Česku

E15.cz > Byznys > Průmysl a energetika > ČEZ šlape do výzkumu malých reaktorů. Podepsal dohodu o spolupráci s už druhou

ČEZ šlape do výzkumu malých reaktorů. Podepsal dohodu o spolupráci s už druhou americkou firmou

EnergostatAktuálněElektrínaPlynTeploElektromobilitaOZE O Energetice »NázoryPráce

ČEZ a Rolls-Royce budou spolupracovat na rozvoji malých reaktorů

Jaderné elektrárny

ČTK

2 komentáře

9. listopad 2020, 14:05

Malé jaderné reaktory aneb SMR: nastupující fenomén dnešní doby?

SERIÁL: Jsou SMR budoucností jádra? – 1. díl: Ve spolupráci s pravidelným přispěvatelem Peak.cz Radkem Škodou a jeho kolegy z ČVUT jsme připravili letní seriál o malých jaderných reaktorech. V prvním díle SMR reaktory představíme a povíme si, jestli má cenu se jimi vůbec zabývat.

V Moravskoslezském kraji by mohly být až čtyři malé reaktory, říká hejtman

Rumunsko by se mohlo stát první evropskou zemí provozující malé jaderné reaktory

21. LISTOPADU 2022 | ALBERT

iROZHLAS



DOMOV SVĚT EKONOMIKA SPORT KULTURA VĚDA KOMENTÁŘE ŽIVOTNÍ STYL VOLBY POČASÍ VINOHRADSKÁ 12
VĚDA VESMÍR PŘÍRODA TECHNOLOGIE HISTORIE TÝDEN VODY

Sledujte válku na Ukrajině →

Kde se nacházíte: [iROZHLAS.cz](#) / [Věda a technologie](#) / [Technologie](#) | Související témata: [ČEZ](#) [Jaderná elektrárna Temelín](#) [jaderný reaktor](#) [Dukovany](#) [elektrína](#) [elektrárna](#) [Dana Drábková](#) [reaktor](#) [Jaderná elektrárna Dukovany](#)

Tušimice, Prunéřov, Ledvice, Poříčí, Dětmárovice. ČEZ zvažuje, že tam místo uhlí postaví modulární reaktory

Obsah

- Co je malý modulární reaktor?
- Charakteristika
- Bezpečnost
- Ekonomika
- Výhody a nevýhody
- Využití
- Uvedení do komerčního provozu
- Vývoj a výzkum
- Příklady projektů



Source: <https://hackaday.com/2019/05/29/atomic-power-gets-small/>

Současný business model jaderných elektráren

- Zdlouhavé testování a licencování
- Výstavba v dané lokalitě
- Velký instalovaný výkon a velká elektrárna
- Prodej komodity (elektriny do sítě)
- Ekonomicky náročné na kapitál v EU a USA

Současná poptávka

- Menší, sériově vyráběný
- Zrychlené testování a licencování
- Výroba nejen elektřiny, ale energie s vysokou přidanou hodnotou
- Rychlejší výstavba, nižší náklady
- Vyšší bezpečnostní standardy

Co je malý modulární reaktor?

- SMR a SMR?

- Small and medium reactor = SMR

- Small modular reactor = SMR

Hlavní řady: vodou chlazené reaktory; vysokoteplotní plynem chlazené reaktory; kapalnými kovy, sodíkem a heliem chlazené reaktory s rychlým neutronovým spektrem; reaktory s roztavenou solí; a nejnověji mikroreaktory

- Reaktor o výkonu **do 300 MWe** (podle IAEA).

- Obecně je ale kategorizace obtížná, různé přístupy

Large Light Water Reactors (LWRs)



~1000-1600 MW_e

~\$3-10B

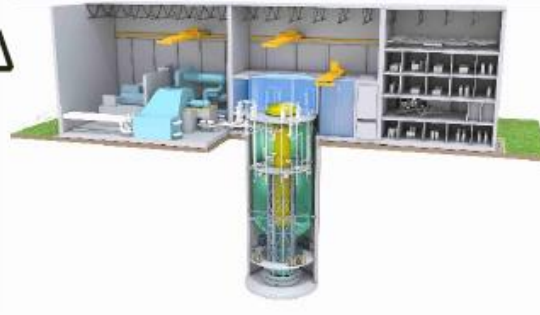
5-10 yrs

Electric output

Construction cost

Construction duration

Small Modular Reactors (SMRs)



~70-300 MW_e

~\$1-3B

3-5 yrs

Microreactors (Nuclear Batteries)



~2-10 MW_e

<\$0.1B

<1 yr

Charakteristika SMR

- Modularita a integrovaný systém

- bezpečnost

- Vysoká úroveň bezpečnosti s mnohem menším počtem bezpečnostních systémů
 - Pasivní bezpečnostní prvky

- Ekonomika sériové výroby

- kratší doba výstavby

- pozitivní dopad na cenu projektu

- Časová hodnota peněz
 - Úspory z rozsahu

Bezpečnost

- Obecně: s menším výkonem se zvyšuje bezpečnost reaktoru a snižuje se potenciální radioaktivního znečištění
- SMR jsou technologicky jednodušší
- Bezpečnost je zajištěna skrze tři fáze:
 1. SMR je svým designem schopný zajistit vysokou úroveň bezpečnosti s mnohem menším počtem systémů = **Safety-by-design**
 2. **Pasivní bezpečnostní systémy**
 3. Aktivní bezpečnostní systémy
- Příklady pasivních prvků:
 - Podzemní umístění
 - Snadnější chlazení reaktoru a regulace chlazení, nižší potřeba vody k chlazení
 - Uzavřený cyklus

Ekonomika SMR

- Jedním z důvodů vývoje SMR je snížení ceny, celkově snížení ekonomické náročnosti jaderných projektů a zvýšení jejich konkurenceschopnosti
- Je zde předpoklad poklesu ceny v důsledku:
 - Kratší doby výstavby
 - Menšího množství bezpečnostních prvků = jednodušší výstavby
 - Rozvoje sériové výroby
 - Opět bude záležet na tom kdo bude stavět a kde bude projekt umístěn
- Kratší doba výstavby je zásadní i z pohledu:
 - Nižších dopadů na investora
 - Časové hodnoty peněz
 - Efekt postupného uvádění do provozu
- Význam dalšího vývoje pro cenu na MWh

Ekonomika SMR

- Nyní co projekt, to jiná cena
- Všechno jsou zatím FOAK
 - Výstavba trvá dlouho
 - Prodražuje se
 - Není ustálený dodavatelský řetězec
 - Ještě se vychytává management atd.
- Důležitý indikátor je zapojení soukromých investorů
- Přítomnost státu? Nebo čistě komerční projekty?

Výhody SMR

- Vyšší bezpečnost skrze pasivní bezpečnostní prvky
- Snadnější výměna paliva, některé typy mají delší palivový cyklus
- Nižší nápor na síť v momentě připojení
- Možnost postavení na brownfieldu po uhelných elektrárnách
- Snížení dopadu kapitálových nákladů na výstavbu elektrárny
- Snadnější financování
- Možnost přistavování nových modulů (lepší reakce na růst spotřeby)
- Zajištění výroby elektřiny a tepla mimo velké distribuční sítě (odlehle a ostrovní oblasti)
- Vyšší flexibilita (ALE stále omezená)

Nevýhody SMR

- Složitý a dlouhý proces licencování FOAK
- Zatím příliš vysoká cena
- SMR nemají dlouhodobě prokazatelný spolehlivý a bezpečný provoz
- Stále přetrvává problém s dlouhodobým uložením odpadu
- Není zaběhnutý osvědčený dodavatelský řetězec
- Není vyzkoušené a osvědčené rozložení výstavby a postupné zapojení více modulů

Využití SMR

- Účelem SMR je doplnit velké bloky
- Umožnění jaderné energetiky pro širší škálu uživatelů a aplikací
 - Nahrazování fosilních elektráren
 - Zajištění kogenerace → výroba tepla
 - Desalinizace vody
 - Výroba vodíku (v souladu s výrobou z OZE)
 - Data centra
 - Industriální využití
- Větší flexibilita a možnost umístění
- Rozvojové státy s malými elektrickými soustavami
- Odlehlé oblasti a oblasti mimo síť

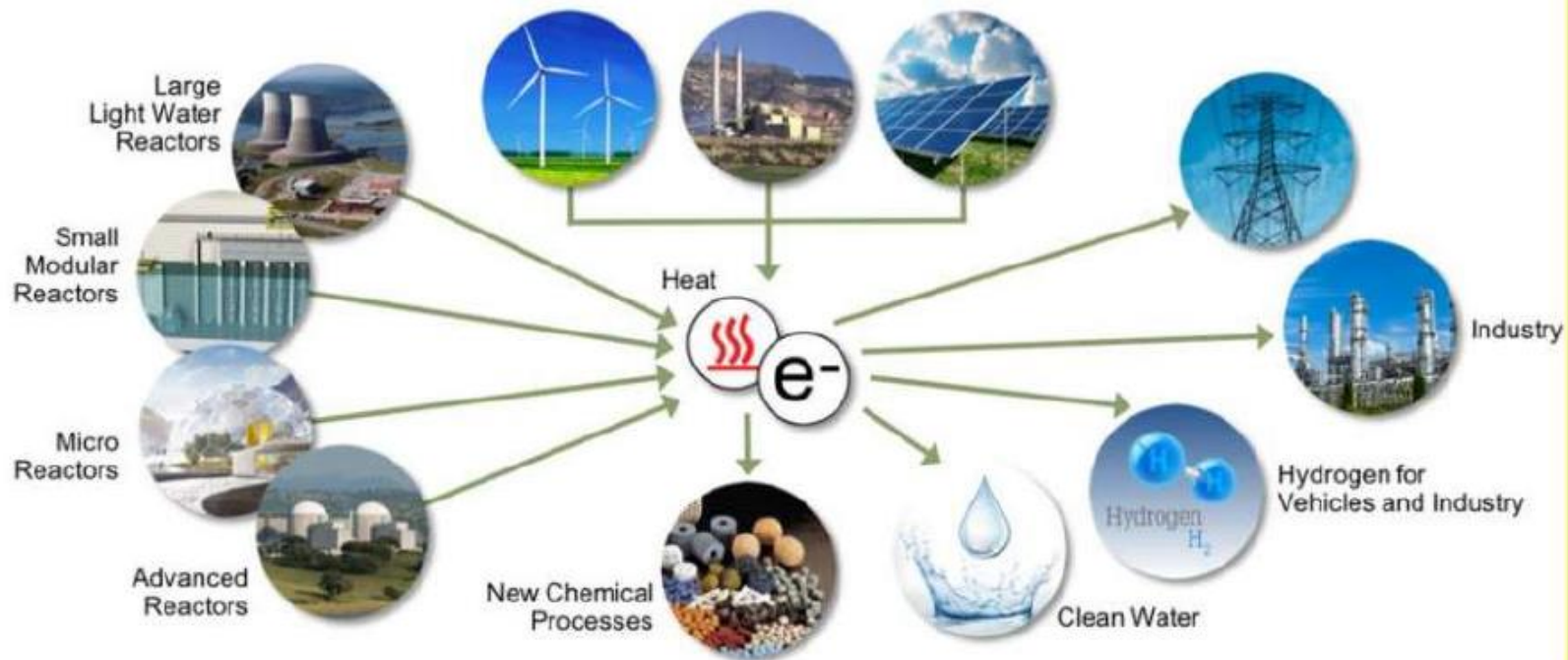
Today

Electricity-only focus



Potential Future Energy System

Integrated grid system that leverages contributions from nuclear fission beyond electricity sector



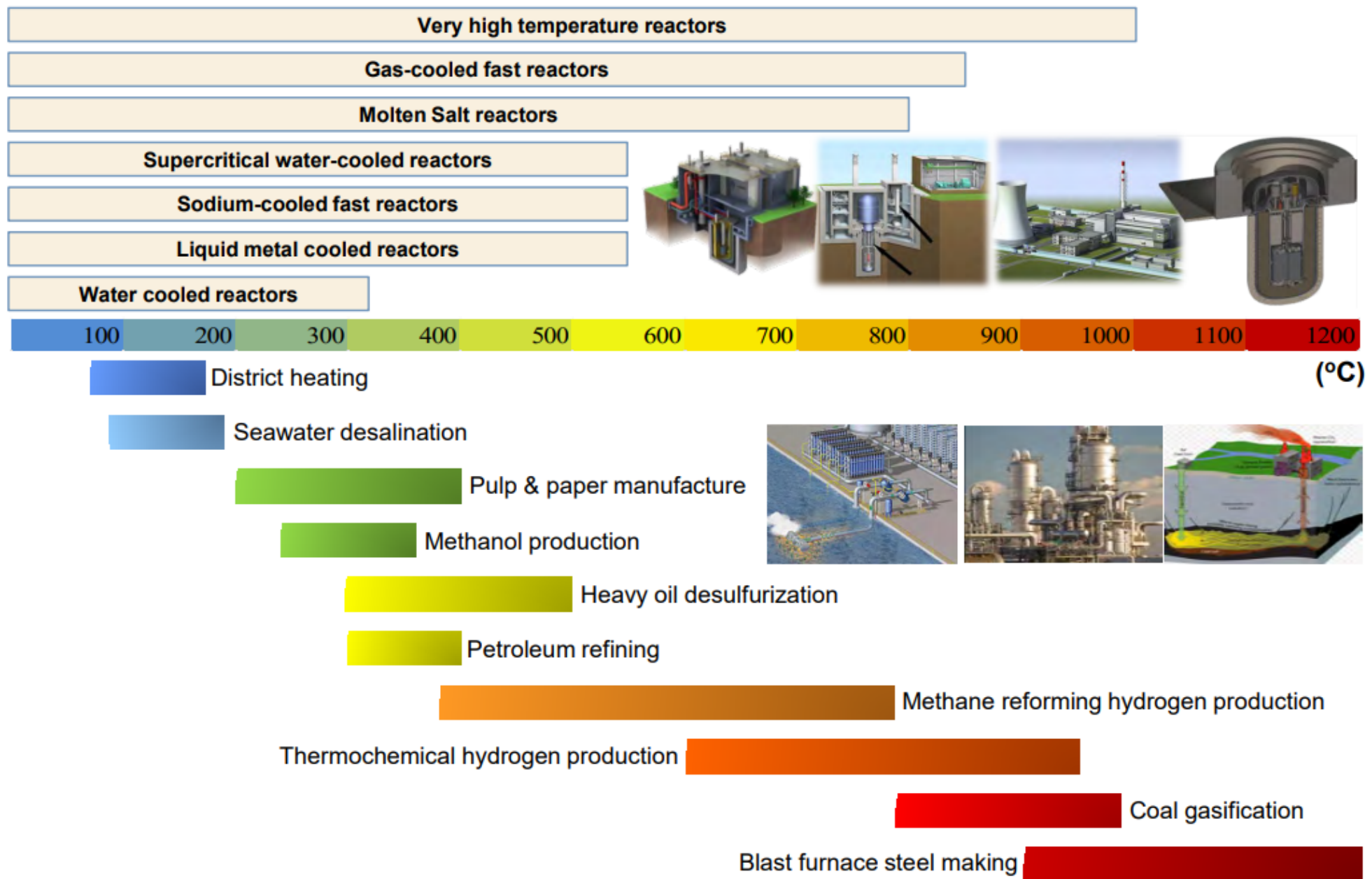
Ref: GenIV IF-NEANH

Uvedení do komerčního provozu

- **V současnosti rychlému rozvoji brání legislativní a regulatorní překážky**
- K uvedení do komerčního provozu potřebují SMR získat licenci a regulatorní povolení
 - Zdlouhavý a složitý proces licencování FOAK, který zároveň naráží na problém, že licenční proces pro SMR by měl být odlišný od klasického pro velké JZ
- **Postoj států v Evropě**
 - V Evropě je nejprogresivnější VB, což souvisí s vlastním vývojem SMR a ambicí exportu
 - Zájem projevily Velká Británie, Finsko, Švédsko, Francie, Ukrajina, Rumunsko
 - Ostatní státy, které jsou otevřené jaderné energii, zatím sledují vývoj a postupně se chystají na možnost SMR – viz aktivity ČEZ
- **Postoj IAEA a EU**
 - 12. února 2019 – **fórum IAEA a EU** → regulace SMR jsou diskutovány a je potřeba je vytvořit
 - V **EU** SMR nejsou regulovány ani zatím licencovány
 - ale **Projekt ELSMOR 2019-2023**
 - **IAEA** problematiku monitoruje – pravidelné publikace
 - 2015 vznik regulatorního fóra pro SMR
 - 11/2017 vznik pracovní skupiny
 - **2024 Evropská průmyslová aliance pro SMR**

Vývoj a výzkum

- Významný rozvoj v posledních letech
- Velké množství projektů, designů, typů paliv, v různé fázi vývoje
- Typy SMR dle IAEA (2020):
 - Pozemní, vodou chlazený malý modulární reaktor
 - Námořní, vodou chlazený malý modulární reaktor
 - Vysokoteplotní plynem chlazený malý modulární reaktor
 - Malý modulární reaktor s rychlým neutronovým spektrem
 - Malý modulární reaktor chlazený roztavenou solí
 - Malý modulární reaktor malé velikosti



Příklady malých reaktorů

- V provozu je pět typů malých reaktorů
- Čtyři projekty SMR jsou ve výstavbě
- Přibližně 40 v aktivním vývoji, z toho 17 v pokročilé fázi

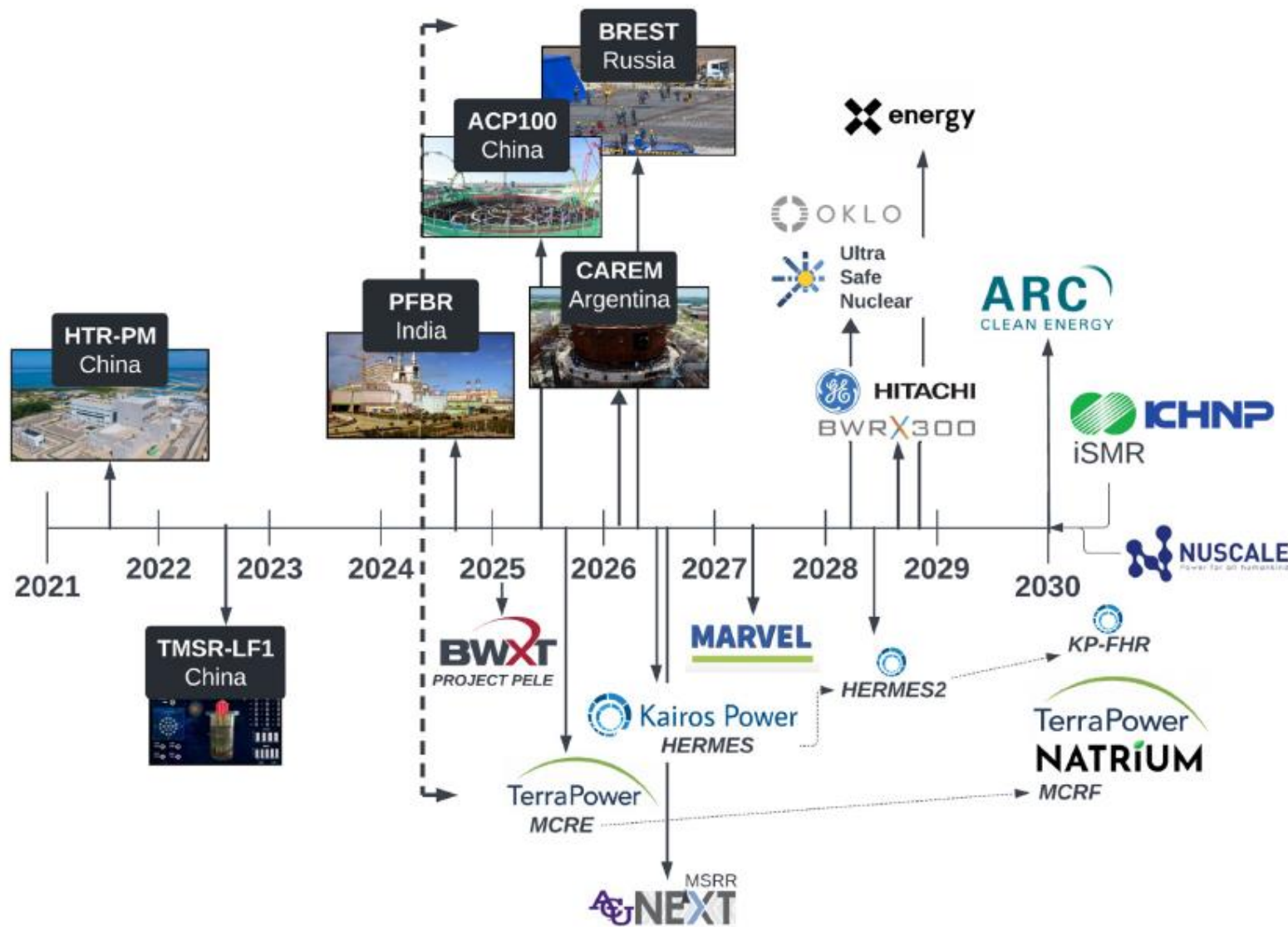
Small reactors operating

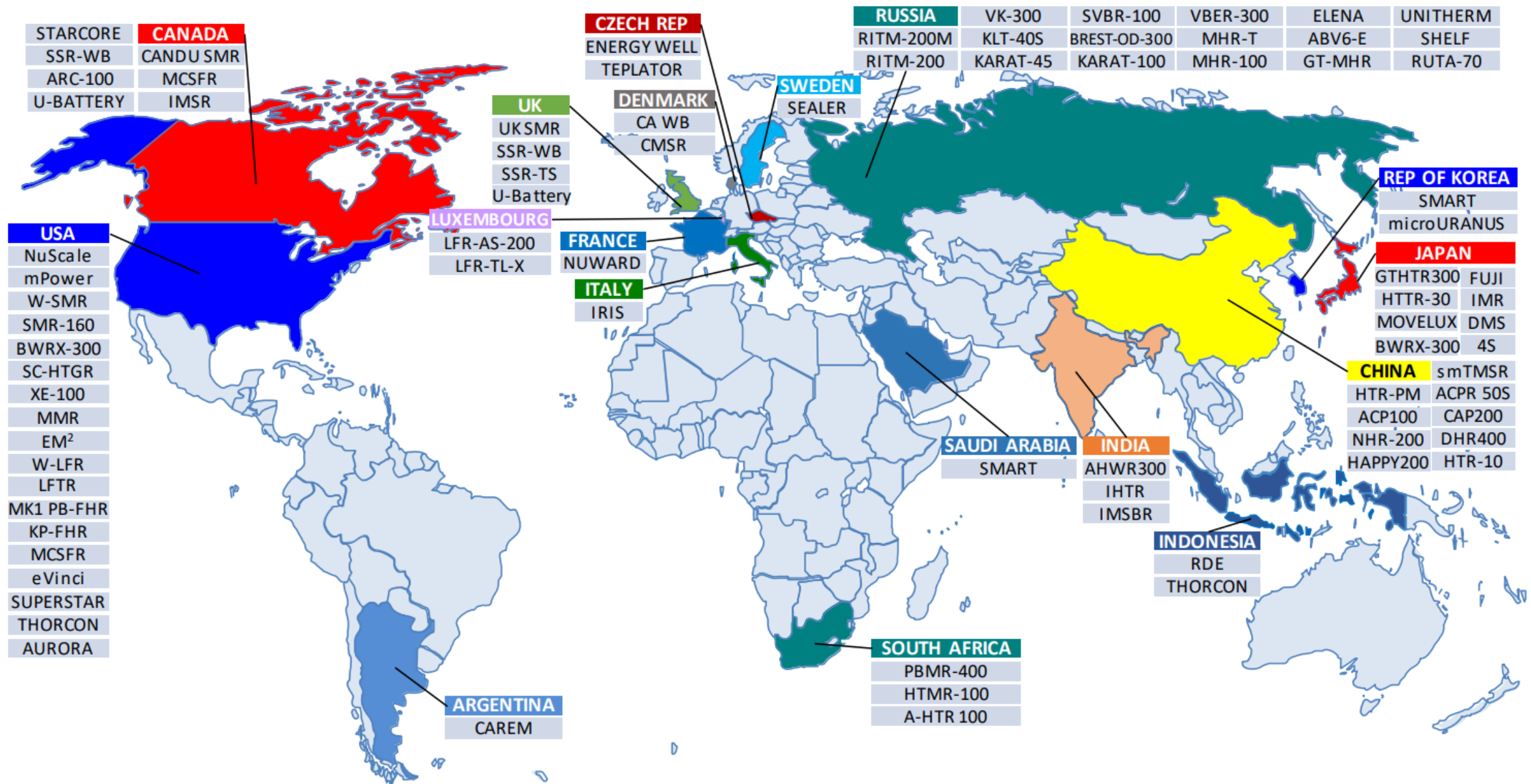
Name	Capacity	Type	Developer
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Pakistan & China
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, India
EGP-6	11 MWe	LWGR	at Bilibino, Siberia (cogen, soon to retire)
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Russia
RITM-200	50 MWe	Integral PWR, civil marine	OKBM, Russia

Small reactor designs under construction

Name	Capacity	Type	Developer
CAREM25	27 MWe	Integral PWR	CNEA & INVAP, Argentina
HTR-PM	210 MWe	Twin HTR	INET, CNEC & Huaneng, China
ACP100/Linglong One	125 MWe	Integral PWR	CNNC, China
BREST	300 MWe	Lead FNR	RDPIE, Russia

Sources: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>



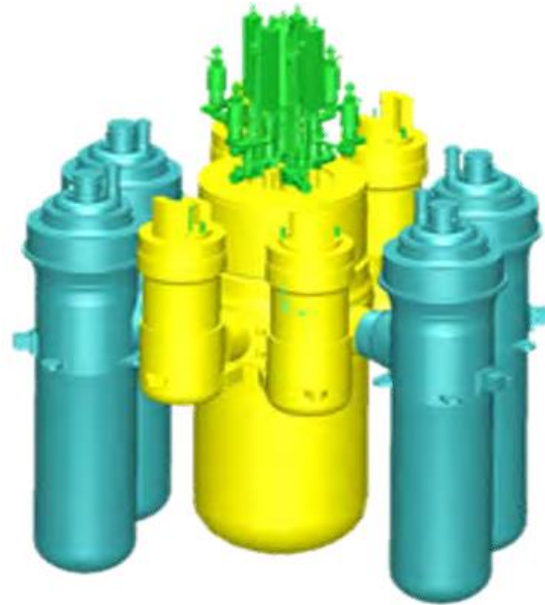


KLT 40S (Rusko)

- Malý tlakovodní reaktor (Rosatom)
- Výkon **35-40 MW**
- Jedná se o dva malé reaktory o celkovém výkonu 70 MW na lodi **Akademik Lomonosov**
- Hlavní zdroj pro část Čukotky a tamní průmyslovou zónu
- Ve výstavbě od 2009, dokončeno na konci roku 2018, **spuštěn v květnu 2020**
- Velmi nákladný a neekonomický projekt

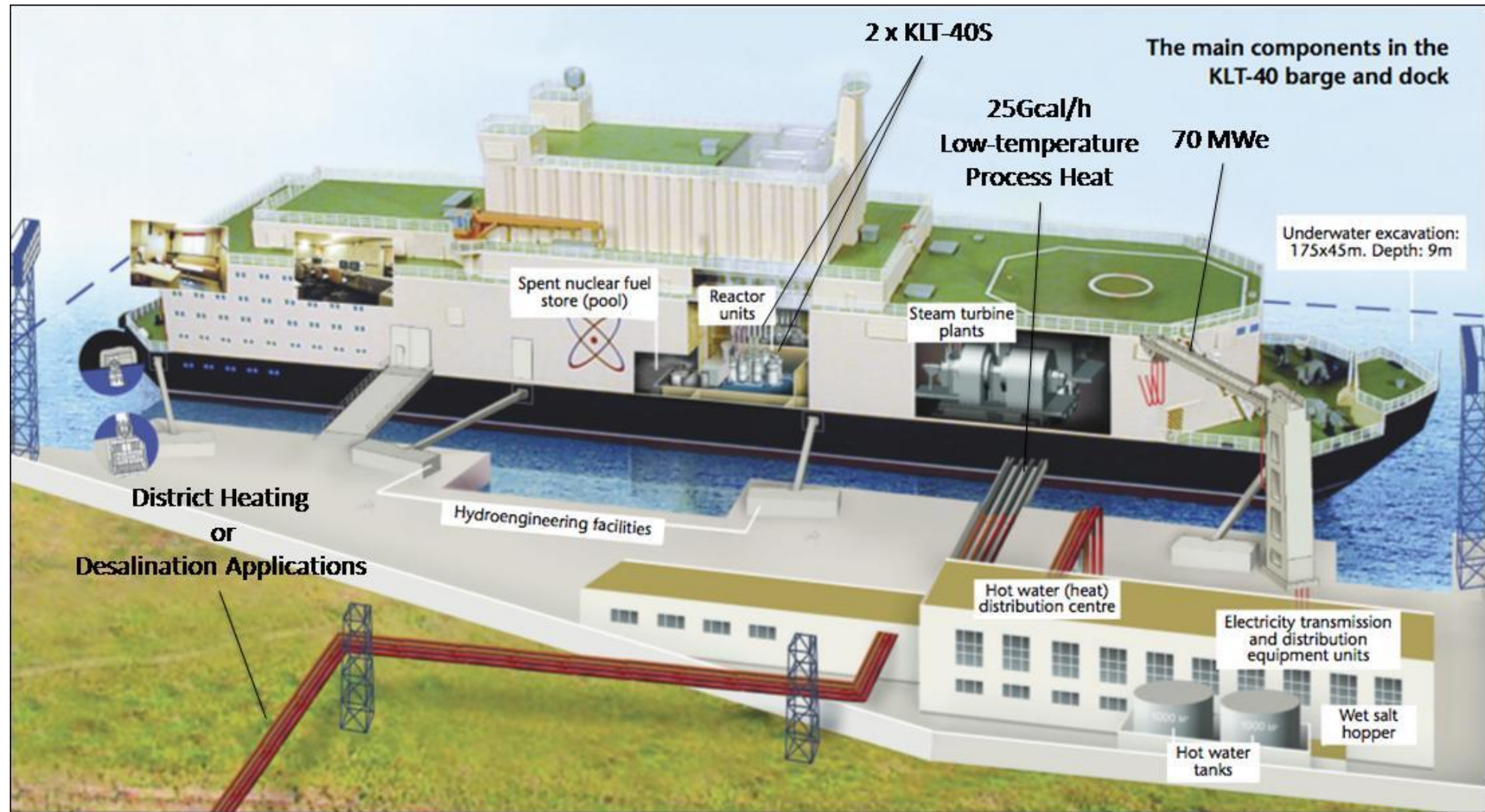


Source: <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/photoarchive/>



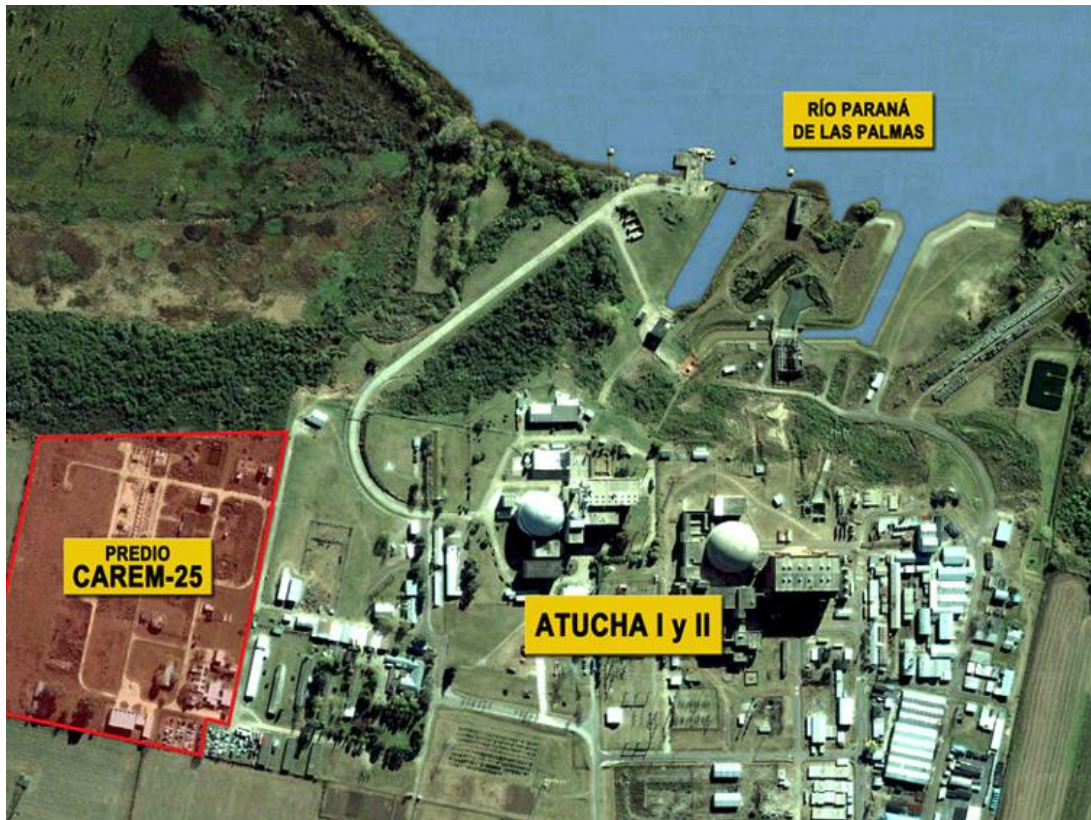
MAJOR TECHNICAL PARAMETERS	
Parameter	Value
Technology developer, country of origin	JSC “Afrikantov OKBM”, Rosatom, Russian Federation
Reactor type	PWR
Coolant/moderator	Light water / light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	150 / 35
Primary circulation	Forced circulation
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	12.7
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	280 / 316
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet in silumin matrix
Number of fuel assemblies in the core	121
Fuel enrichment (%)	18.6
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	45.4
Refuelling Cycle (months)	30-36
Reactivity control mechanism	Control rod driving mechanism
Approach to safety systems	Active (partially passive)
Design life (years)	40
Plant footprint (m ²)	4320 (Floating NPP)
RPV height/diameter (m)	4.8 / 2.0
RPV weight (metric ton)	N/A
Seismic Design (SSE)	9 point on the MSK scale
Distinguishing features	Floating power unit for cogeneration of heat and electricity; no onsite refuelling; spent fuel take back
Design status	Connected to the grid in Pevek in December 2019. Entered full commercial operation in May 2020.

Source:
https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf



Source: <https://pavelsuk.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=636387>

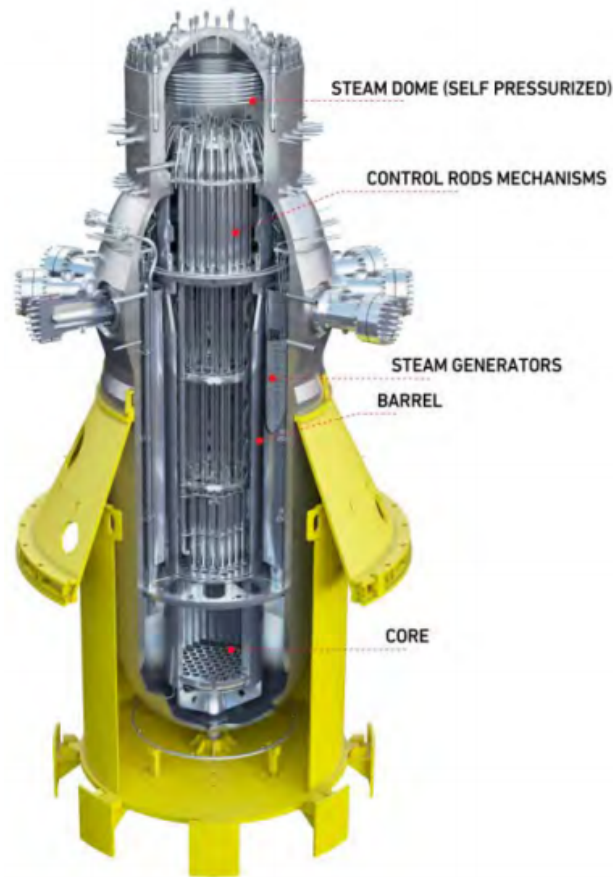
CAREM 25, 100 a 300 (Argentina)



Source:

https://cdn.ans.org/cafe/2014/02/CAREMfromCNEAsite.jpg?_ga=2.13281215.964155339.1607970990-926432101.1607970990

- Výkon 25 MWe, v oblasti Formosa.
- Výstavba CAREM 25 od 2014, plánované spuštění 2023
- Čistě argentinský design, licencovaný 2009
- CAREM 300 je plánovaný pro export – pouze ve vývoji.



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS

Parameter	Value
Technology developer, country of origin	CNEA, Argentina
Reactor type	Integral PWR
Coolant/moderator	Light water / Light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	100 / ~30
Primary circulation	Natural circulation
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	12.25 / 4.7
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	284 / 326
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet/hexagonal
Number of fuel assemblies in the core	61
Fuel enrichment (%)	3.1% (prototype)
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	24 (prototype)
Refuelling Cycle (months)	14 (prototype)
Reactivity control mechanism	Control rod driving mechanism (CRDM) only
Approach to safety systems	Passive
Design life (years)	40
Plant footprint (m ²)	Not available
RPV height/diameter (m)	11 / 3.2
RPV weight (metric ton)	267
Seismic Design (SSE)	0.25g
Fuel Cycle Requirements or Approach	390 full-power days and 50% of core replacement (prototype)
Distinguishing features	Core heat removal by natural circulation, pressure suppression containment
Design status	Under construction (as prototype)

Source:
https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

Rolls Royce (VB)

- Výkon 220 až **470 MWe**, typ PWR
- Životnost 60 let (výstavba 5 let)
- Velikost reaktoru 16 x 4 metry
- Rozloha 40 000 m² (10x menší než klasická elektrárna)
- Projekt má vést ke snížení ceny elektřiny ve Velké Británii
- Celkově chce společnost postavit 16 SMR
- Mají být instalovaný na místech odstavených jaderných elektráren
- Zájem o projekt projevila ČR (spolupráce s ČEZ od 2020), Kanada, USA a Čína



Source: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/rolls-royce-nase-male-reaktory-mohou-vyrabet-elektřinu-za-podobnou-cenu-jako-offshore-vte>



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS

Parameter	Value
Technology developer, country of origin	Rolls-Royce and Partners, United Kingdom
Reactor type	3-loop PWR
Coolant/moderator	Light-water / Light-water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	1276 / 443
Primary circulation	Forced (3 pumps)
Operating Pressure (primary/secondary), MPa	15.5 / 7.6
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	296 / 327
Fuel type/assembly array	UO ₂ / 17x17 Square
Number of fuel assemblies in the core	121
Fuel enrichment (%)	4.95 (max)
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	55 – 60
Refuelling Cycle (months)	18 – 24
Reactivity control mechanism	Rods and Gd ₂ O ₃ solid burnable absorber
Approach to safety systems	Active and passive
Design life (years)	60
Plant footprint (m ²)	10 000
Site footprint (m ²)	40 000
RPV height/diameter (m)	11.3 / 4.5
RPV weight (metric tonnes)	220
Seismic Design (DBE)	> 0.3g
Fuel cycle requirements / Approach	Open cycle; Spent fuel transferred to a pool for storage prior to transfer to long term dry cask storage.
Distinguishing features	Modular approach facilitating rapid and cost-effective build.
Design status	Conceptual design

Videa ke zhlédnutí:

https://www.youtube.com/watch?v=cFFS_P3EnMk&ab_channel=Rolls-Royce

proces výroby a výstavby:

https://www.youtube.com/watch?v=JK8KGi dUnpM&ab_channel=UKNuclearSMRConsortium

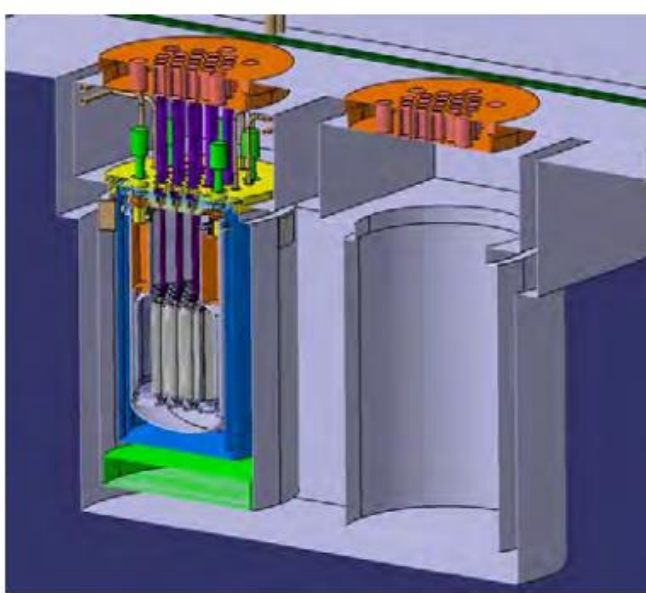
komentář k plánu Rolls-Royce ve VB:

https://www.youtube.com/watch?v=8KXTNnK0DUU&ab_channel=TomoNewsUS

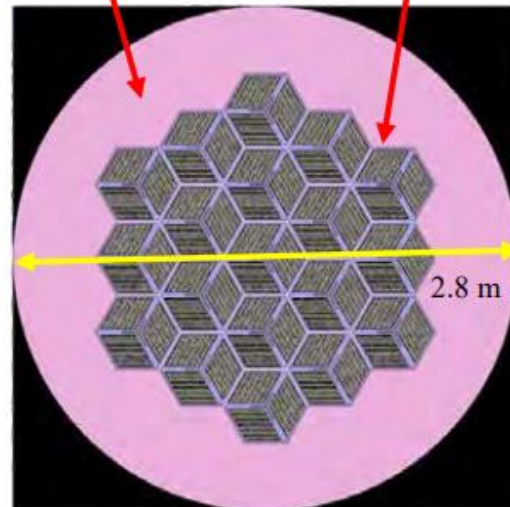
Source:
https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

Energy Well – ÚJV ŘEŽ

- Patentován
 - Ekonomická studie → potvrdila komerční potenciál
 - Studie proveditelnosti
- Nyní fáze finalizace základního designu
 - Čeká je velké množství aktivit, které se musí udělat, jako ověření technologie a designu
- Reaktor **IV. Generace**
- Chlazený roztavenou solí
- Výkon do **50 MW**
- Specifikum: velikost lodního kontejneru
- ČR je v tomto vývoji ve světovém srovnání napřed, ale stále je to běh na dlouhou trať



Graphite reflector Fuel assemblies



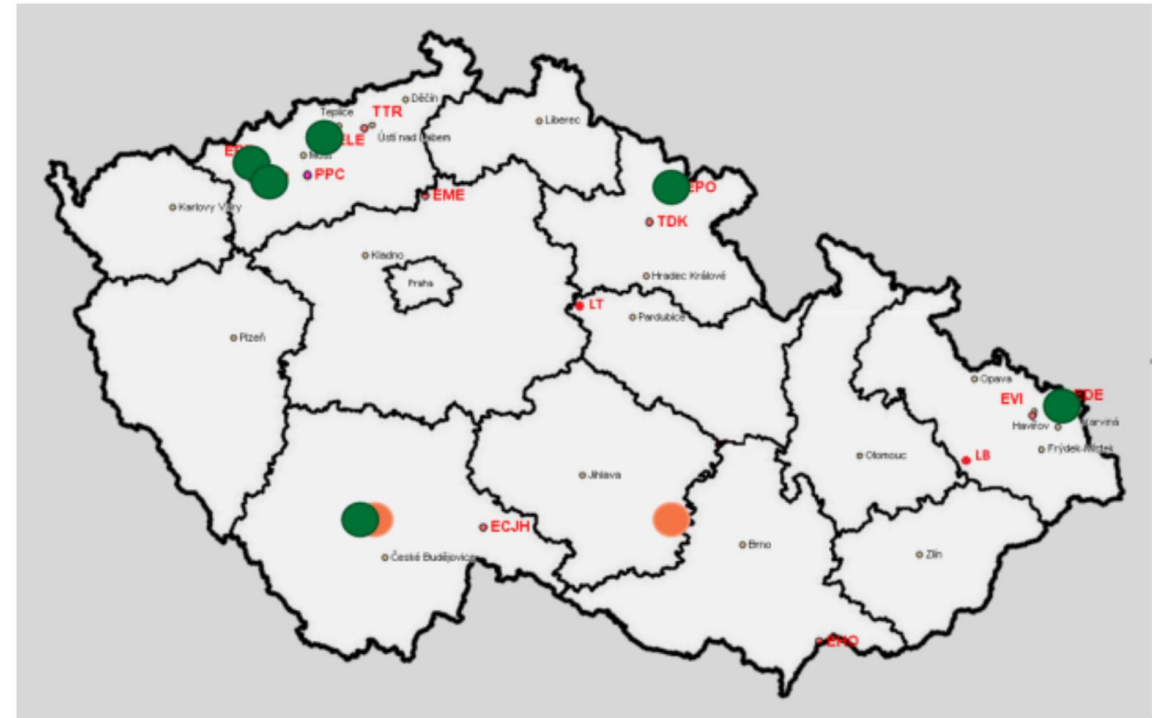
MAJOR TECHNICAL PARAMETERS

Parameter	Value
Technology developer, country of origin	Centrum výzkumu Řež, Czech Republic
Reactor type	Fluoride High Temperature reactor, pool type
Coolant/moderator	Molten Salt FLiBe
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	20 / 8
Primary circulation	Forced (mechanical pumps)
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	Atmospheric pressure
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	650 / 700
Fuel type/assembly array	TRISO
Number of fuel assemblies in the core	19
Fuel enrichment (%)	15
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	70
Refuelling Cycle (months)	84
Reactivity control mechanism	Control rods
Approach to safety systems	Active / Passive
Design life (years)	Not defined
Plant footprint (m ²)	< 4000
RPV height/diameter (m)	6 / 3
RPV weight (metric ton)	< 100
Seismic Design (SSE)	Yes
Fuel cycle requirements / Approach	Once through; no onsite refuelling; replace reactor approach
Distinguishing features	Passive decay heat removal, transportable reactor,
Design status	Pre-conceptual design

Source:
https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

SMR v ČR

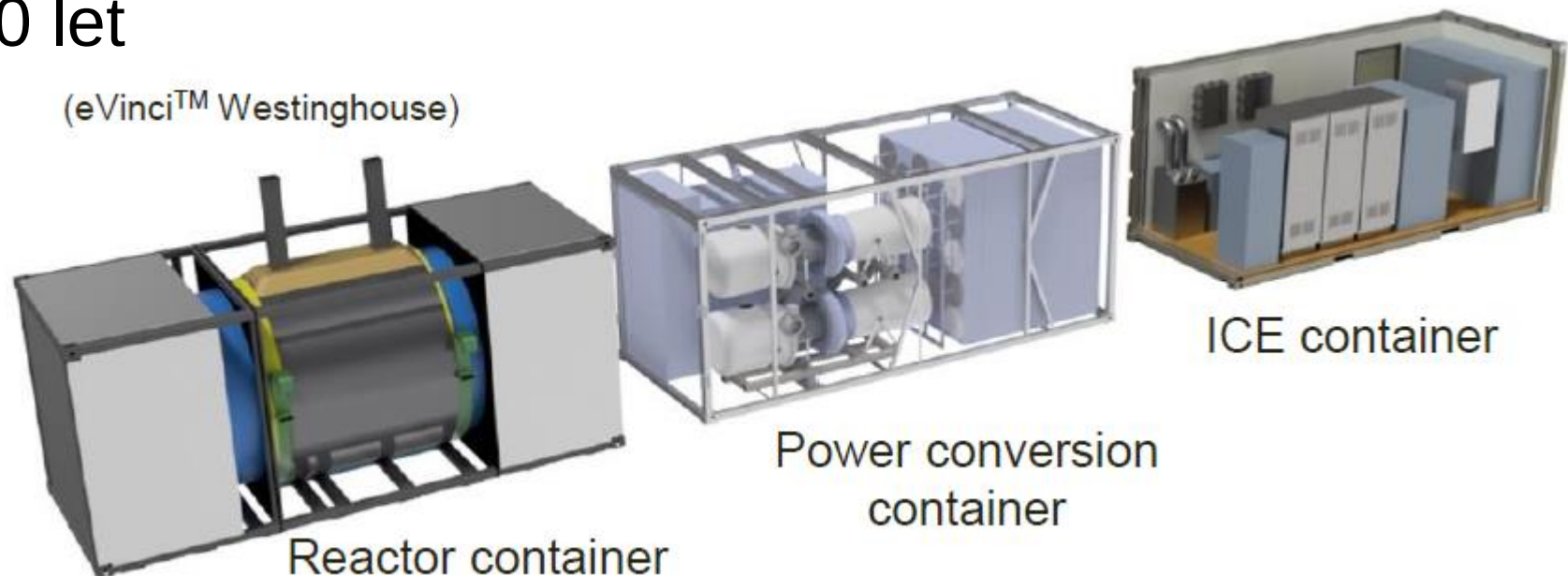
- ČEZ:
 - Temelín, Tušimice, Prunéřov, Ledvice, Poříčí a Dětmarovice na severu Moravy
- Moravskoslezský kraj:
 - Třebovice, Dětmarovice u Karviné, Blahutovice na Novojičínsku, čtvrtý malý reaktor by mohl být v Třinci pro potřeby Třineckých železáren.
- Využití – výroba elektřiny a tepla
- Nový kontext - dekarbonizace



Mapa potenciálních míst na stavbu „malých reaktorů“ | Zdroj: ČEZ

Microreaktory

- 1-20 MW elektřina/teplo
- Standardizovaný design
- Semi-autonomní provoz
- Výměna paliva 5-10 let
- Tovární výroba
- Suché chlazení
- Žádné uložistě



Závěrem

- SMR jsou rozvíjející se technologie
- Přináší nové možnosti využití jaderné energie i pro nové aktéry
- Z pohledu bezpečnosti znamenají zjednodušení a zavedení více pasivních prvků
- Z pohledu ekonomiky, konstrukce je finančně nejnáročnější, mohly být levnější než klasické bloky, ale zatím se jedná o FOAK, ukáže až sériová výroba
- Jednou z hlavních výzev pro další vývoj SMR je licencování a regulace
- Využití v EU je předpokládáno až v druhé polovině 30. let/začátek 40. let, ale závisí to vše na rychlosti vývoje a regulatorních překážkách



district heating



flood protection



desalination



freight ship propulsion



e-vehicle charging stations



hydrogen electrolyzers



existing factories and
chemical plants



biofuels



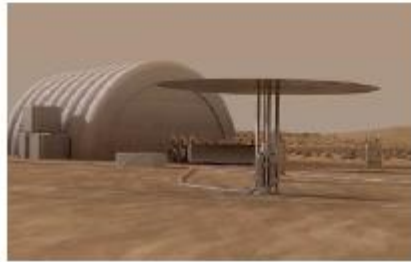
military bases



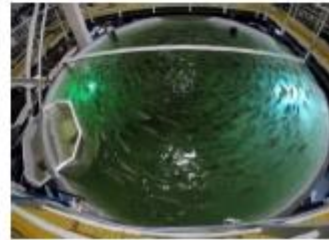
microgrids (remote communities, islands)



mining sites



space installations



indoor aquaculture



high-end metals, ceramics and glass



data centers



indoor farming



portable pharma

Děkuji za pozornost.

Prostor pro otázky