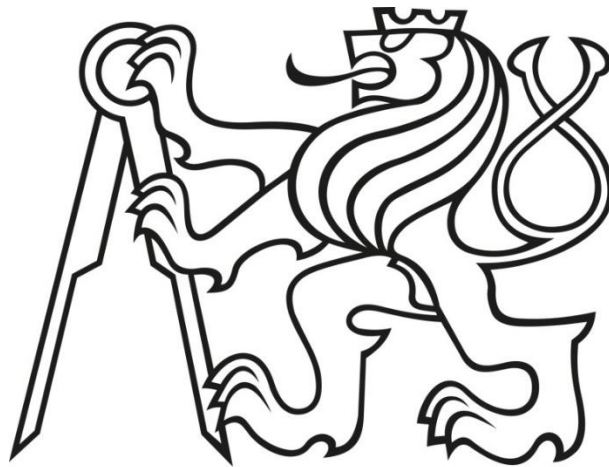


České Vysoké Učení Technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ekonomie provozu výzkumných a demonstračních reaktorů 4. generace:

Aplikace na projekt GFR ALLEGRO

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Bělovský, CSc.

Praha, 2016

Bc. Jan Kundrlík

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Jan Kunderlík

Studijní program: elektrotechnika, energetika a management
Obor: ekonomika a řízení elektrotechniky

Název tématu: Ekonomie provozu výzkumných a demonstračních reaktorů 4. generace:
Aplikace na projekt GFR ALLEGRO

Pokyny pro vypracování:

- charakteristika 4. generace jaderných reaktorů
- projekty rychlých reaktorů 4. generace v EU
- analýza financování jednotlivých projektů
- projekt ALLEGRO
- výpočet provozních nákladů demonstrátoru ALLEGRO
- možnosti částečného samofinancování projektu ALLEGRO

Seznam odborné literatury:

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Projected Costs of Generating Electricity. OECD Publication, 2010. ISBN 978-92-64-08430-8.

LAMARSH, John R. Introduction to nuclear engineering. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, xv, 783 s. ISBN 0-201-82498-1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Ladislav Bělovský, CSc. – ÚJV Řež, a.s.

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2015/2016
L.S.

Prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 31.3.2016

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Ladislavu Bělovskému, CSc. z ÚJV Řež, který je autorem myšlenky tohoto tématu, za jeho trpělivost a ochotu, za dobré rady při řešení problematiky a vstřícnost při překonávání problémů s ní spjatými. Mé poděkování také patří Doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za poskytnutí velmi dobrého nadhledu na tuto problematiku a za užitečné rady.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem a dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Abstrakt

Energetiku čekají v následujících desetiletích výrazné změny. Mění se přístup společnosti k přijímání rizik, na ochranu biosféry je věnováno stále více úsilí a do popředí zájmu se stále více dostávají takzvané obnovitelné zdroje. Oproti tomu spotřeba primárních zdrojů stále roste, tím jak se naše civilizace vyvíjí, hledáme stále výkonnější, spolehlivější a koncentrovanější zdroje a zároveň od těchto řešení vyžadujeme vysokou efektivitu a ekonomičnost.

Jedním z řešení této problematiky může být i technologie jaderných reaktorů IV. generace.

Tato práce pojednává o demonstračním modelu jaderného reaktoru s názvem ALLEGRO. Jedná se o rychlý reaktor IV generace chlazený plynem. Práce se soustředí na doposud opomíjenou ekonomickou stránku reaktorů IV. generace. Je hledána možnost snížení provozních nákladů díky samofinancování a na tu navazuje výpočet předpokládaných provozních nákladů tohoto zařízení.

Klíčová slova:

ALLEGRO, GFR, IV. generace jaderných reaktorů, samofinancování, provozní náklady

Abstract

There will be major changes in the energy industry during following decades. The society's reception of risks is changing, the focus is shifting to the protection of biosphere and moreover towards renewable resources. Yet the primary resources consumption is increasing as our civilization is advancing and we are looking for more efficient, reliable and concentrated sources, which would be economic as well.

One of the solutions to fulfil these requirements is the technology of IV. generation of nuclear reactors.

This master's degree project deals with demonstrational model of nuclear reactor ALLEGRO. It is 4th generation fast reactor with gas coolant. This thesis is focused on often neglected economic aspect of generation IV. The option to reduce operating costs through self-funding is analysed. The subsequent calculation of anticipated operating cost of this facility is presented.

Key words:

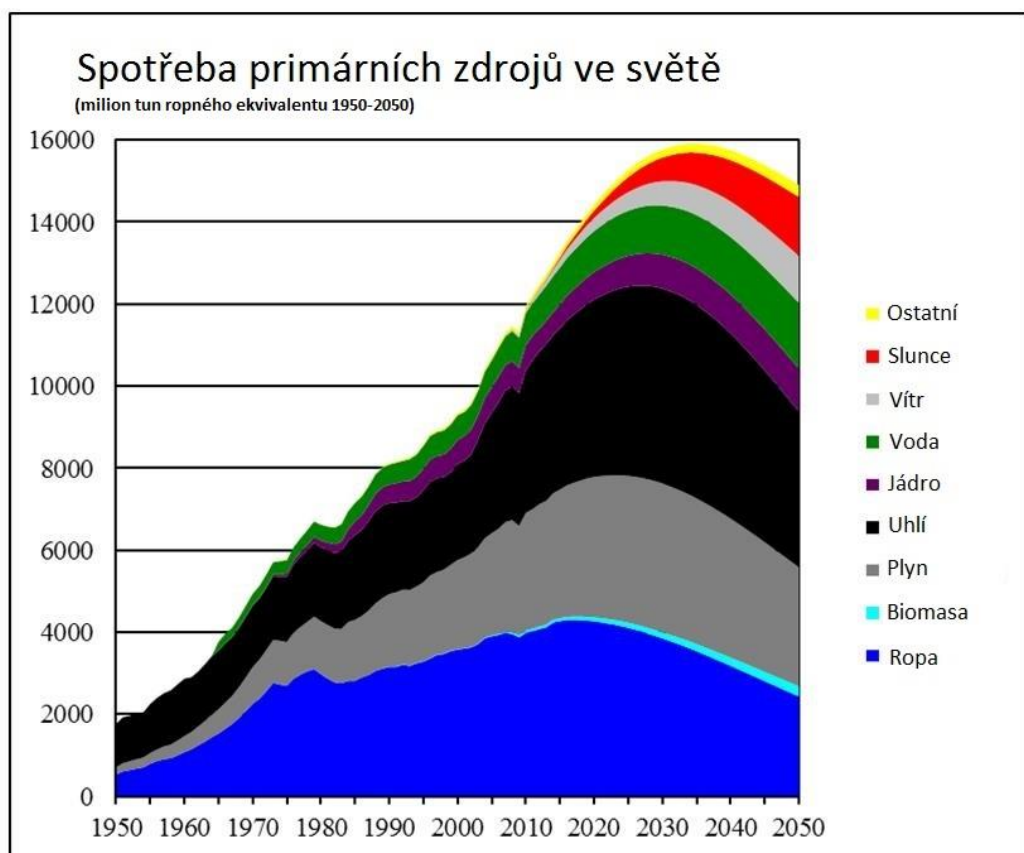
ALLEGRO, GFR, generation IV reactor, self-financing, operating costs

Obsah

Obsah	7
1 Budoucnost jaderné energetiky	8
2 Čtvrtá generace jaderných elektráren	13
3 Projekty rychlých reaktorů IV. generace v EU	17
3.1 Projekt ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)	17
3.2 Projekt ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator)	19
3.3 Projekt ALLEGRO	21
4 Možnosti samofinancování demonstrátoru ALLEGRO	39
5 Provozní náklady	43
5.1 Lidské zdroje	43
5.2 Média	50
5.3 Vlastní spotřeba	53
5.4 Údržba	55
5.5 Ostatní	58
5.6 Celkové náklady	59
6 Závěr	62
7 Literatura	64
Seznam zkratk	69
Příloha	71
Olovem chlazený rychlý reaktor Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)	71
Plynem chlazený rychlý reaktor – Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)	73
Reaktor chlazený roztavenou solí Molten Salt Reactor (MSR)	76
Sodíkem chlazený rychlý reaktor - Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)	79
Reaktor chlazený vodou s nadkritickými parametry Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)	82
Vysokoteplotní reaktor Very-High-Temperature Reactor (VHTR)	88

1 Budoucnost jaderné energetiky

V současné době je v oblasti vývoje energetiky diskutováno několik poměrně výrazných směrů vývoje. Prvním z nich je energetická nezávislost. Jedná se o logickou snahu vymanit národní (či unijní) zdroje energie z cizího vlivu. Státy se s tímto problémem vypořádávají dvěma způsoby, buď začínají využívat energetické zdroje, k nimž mají z tohoto pohledu bezpečný přístup, nebo se snaží o diverzifikaci dodavatelů energetických surovin. Je nutné zmínit, že zde existuje ještě třetí cesta. Jedná se o oblast výzkumu a vývoje nových zdrojů energie.



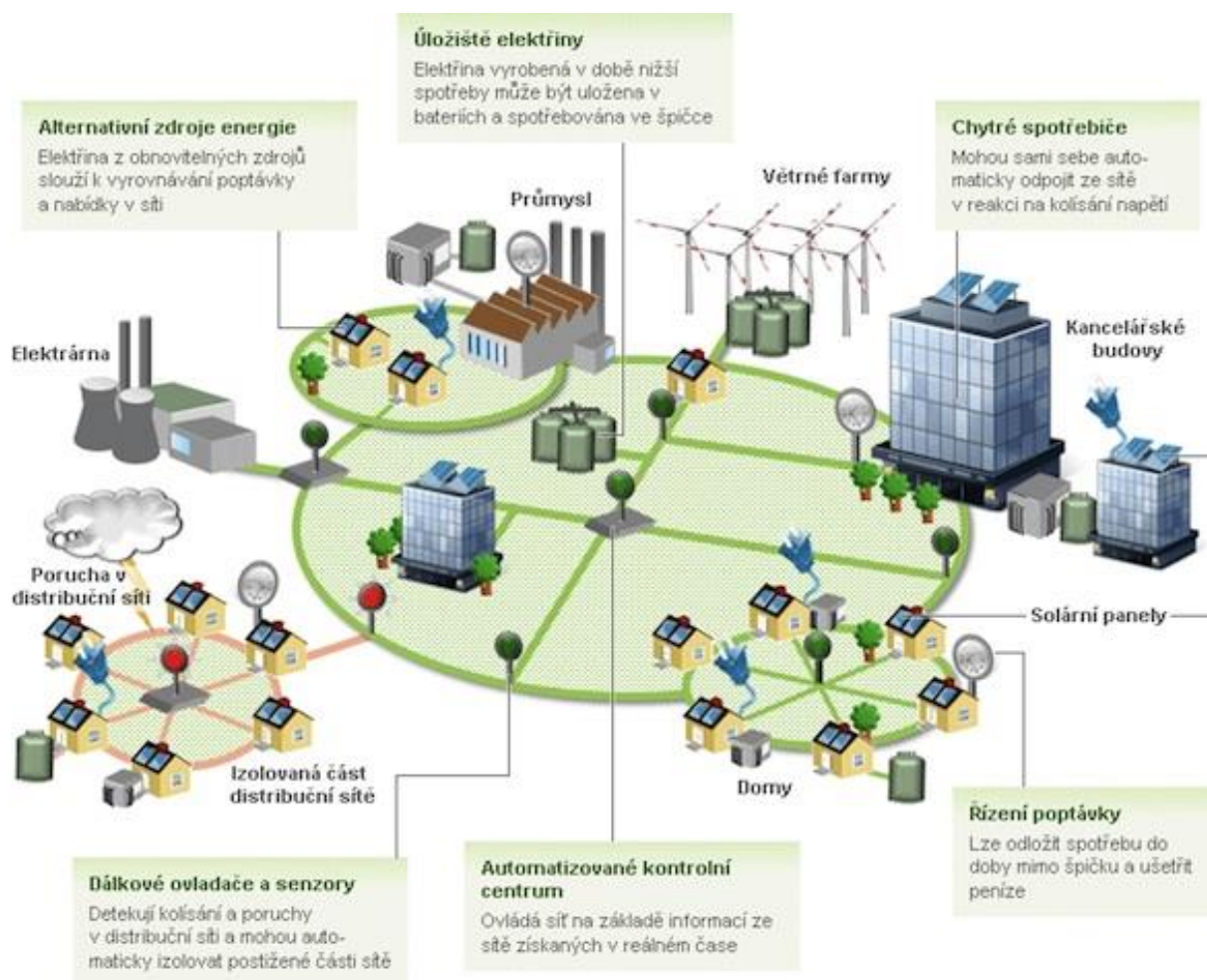
Obr. 1: Spotřeba primární energie ve světě [1]

Další diskutovanou vývojovou cestou je vývoj malých lokálních zdrojů. Tato koncepce jde ruku v ruce s technologií chytrých sítí a snahou o využití obnovitelných zdrojů. Tato myšlenka ve své podstatě vyžaduje přebudování našich sídel na pasivní [2] a nulové [2] domy. Zároveň předpokládá přestavbu energetické soustavy, jejím přechodem na chytré [3] sítě a předání značné odpovědnosti do rukou samotných spotřebitelů a nyní

již i dodavatelům elektrické energie. Domy by měly být nejen úsporné, ale zároveň i vybaveny solárními panely, větrnými elektrárnami nebo například tepelnými čerpadly, aby pokryli vlastní spotřebu, případně byly schopny energii do sítě ještě dodat. Obyvatelé domů si pak sami zvolí, zda budou využívat levnější energii ve chvíli, kdy je dostupná, nebo dají přednost svému komfortu. Tato energetická koncepce samozřejmě počítá s velkými výrobními podniky a dalšími zařízeními se značnou spotřebou. Pro tento případ by zároveň měla energetická soustava obsahovat i silné zdroje elektrické energie, jejichž náklady na výstavbu a provoz budou co možná nejnižší. Slabinou této koncepce [4] je momentální nedostupnost technologie, jež by levně a efektivně dokázala uchovávat velké množství elektrické energie. Rovněž počet domácích spotřebičů energie, u kterých uživatelé nezajímá, kdy budou v provozu, je značně omezený. [4]



Obr. 2: Schéma chytré domácnosti [4]



Obr. 3: Schéma napájení chytré sítě [4]

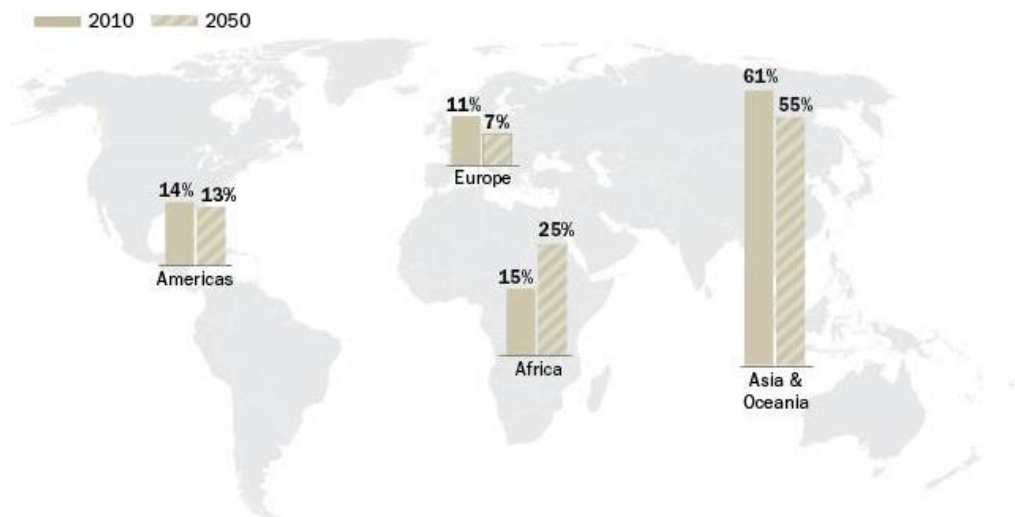
Nadále bude jistě patrná snaha o snížení využívání fosilních paliv. Nejen kvůli riziku globální změny klimatu, ale i vyčerpání jejich geologických zásob. V této oblasti již nyní mnoho států zavedlo značná omezení a v následujících letech se k nim budou další přidávat a pravidla se budou zpřísnovat (např. Kjóto 1997, Paříž 2015). I když lze nové typy fosilních elektráren považovat za čisté zdroje energie [5], je zde stále problém s ukládáním značného množství popílku. Přesto, že se jedná o levný a spolehlivý zdroj energie, fosilní paliva nejsou nevyčerpatelná. [4]

Poslední oblastí je energie jádra. Zdá se, že jaderná energetika prožívá druhou vlnu „jaderné renesance“. Zčásti je to způsobeno snahou opustit fosilní paliva a přesto zachovat silné kompaktní zdroje s levnými provozními náklady. Druhou silnou motivací je technologický pokrok. V současné době jsou pasivní bezpečnostní prvky a inherentní bezpečnostní prvky již standardem. Plánovány jsou aktivní zóny, které jsou schopny

v případě výpadku napájení se nejen samy odstaví, ale hlavně i odvést zbytkové teplo pomocí přirozeného proudění. Technologie transmutace prvků [6], rychlých reaktorů [7] a přepracování paliva [8], tedy schopnost uzavření palivového cyklu, se stává ekonomicky zajímavou. [4]

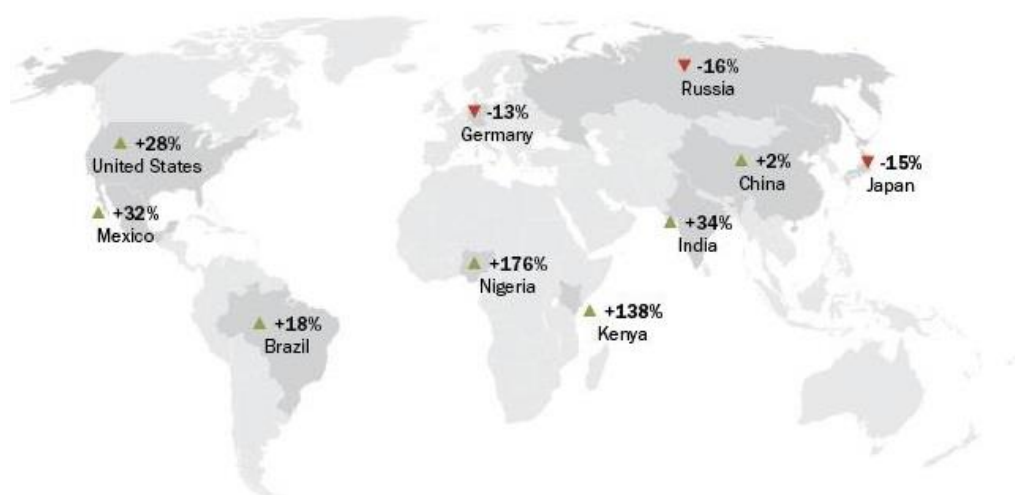
Je jasné, že poptávka po energii v globálním měřítku v následujících desítkách let poroste. Odhaduji, že doba levné energie nenávratně skončila. A lze rovněž očekávat, že řešení této situace nebude jednoduché. [4]

Jaké místo v budoucnosti zaujme jaderná energetika? Lze předpokládat, že v případě rozvinuté části světa (Evropská unie, Spojené státy americké,...) bude spotřeba narůstat oproti méně vyvinutým částem světa jen minimálně. Tyto oblasti se vyznačují nejen dobrou infrastrukturou, funkčním právním systémem, ale třeba i obyvatelstvem se zdravým zájmem o životní prostředí. Z těchto charakteristik prostředí lze odhadnout požadavky kladené na nové jaderné zdroje. Co do výkonu lze očekávat silné jaderné elektrárny s výkonem nad 1000 MWe. Z historických a hlavně legislativních důvodů budou pravděpodobně stát na místech svých předchůdců. Z ekonomických důvodů budou vyžadovány nízké provozní náklady. V tomto ohledu se jeví zajímavě reaktory využívající štěpné a štěpitelné prvky s přirozeným zastoupením izotopů (není nutné obohacování [9]). Rovněž uzavřený palivový cyklus se z tohoto pohledu jeví, jako logická volba. S vyššími bezpečnostními standardy porostou i náklady na instalaci a provoz těchto systémů. Značná úspora těchto prostředků může být získána využitím pasivních bezpečnostních prvků [10] a systému odvodu zbytkového tepla pomocí přirozené cirkulace [11]. Díky rostoucí poptávce po vodíku také lze očekávat rostoucí poptávku po menších modulárních typech jaderných reaktorů. [4]



Obr. 4: Rozdělení světové populace podle oblastí [12]

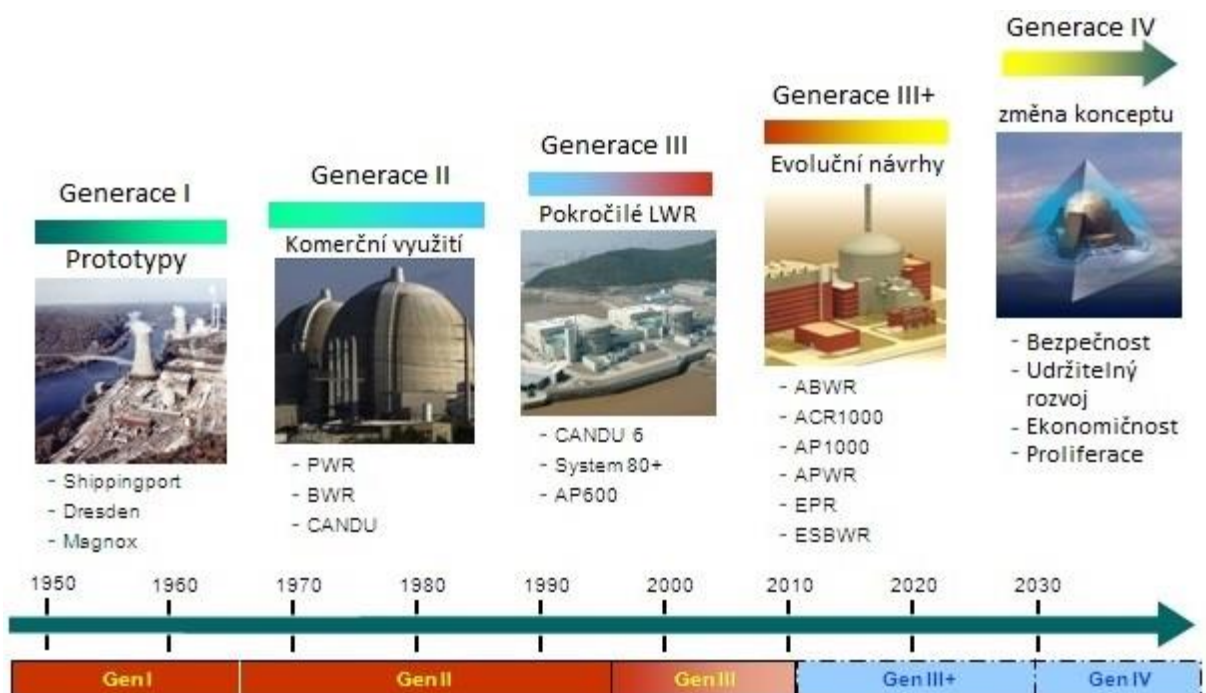
Naproti tomu v méně rozvinutých částech světa je očekáván nárůst populace a s tím spojená i zvyšující se poptávka po elektrické energii. Naše společnost je na elektřině závislá a většina našich běžných činností již bez ní není možná. Je rozumné očekávat, že i zbytek světa se bude chtít svou životní úroveň přiblížit rozvinutým státům. V mnohých oblastech světa ještě dnes neexistuje elektrická přenosová soustava. Pokud ano, mnohdy není schopna převádět příliš vysoké výkony. Pro takovéto oblasti se jeví vhodným řešením malé modulární elektrárny [13]. V principu jsou založené na známé vyzkoušené technologii. Jejich předností není vysoký výkon, ale vysoká spolehlivost, dobrá míra proliferace, nízké nároky na obsluhu a vysoká bezpečnost. [4]



Obr. 5: Odhadovaná změna počtu obyvatel pro vybrané země [12]

2 Čtvrtá generace jaderných elektráren

Jaderné elektrárny (reaktory) prochází, jako každé dílo, svým vývojem. V současné době jsou nejčastěji děleny podle amerického přístupu k jaderným energetickým reaktorům na takzvané generace [14]. Samozřejmě není možné toto dělení pojímat dogmaticky, protože některé jaderné energetické reaktory mohou představovat mezistupeň mezi jednotlivými generacemi (např. Temelín vychází z koncepce energetických jaderných reaktorů druhé generace, ale ve výsledku má mnoho technologií a charakteristik odpovídajícím generaci třetí). [14]



Obr. 6: Generace jaderných elektráren [14]

První generace se skládá výhradně z prototypů jaderných elektráren. Patří sem první jaderná elektrárna s tlakovodním reaktorem Shippingport, jež byla uvedena do provozu roku 1957. Můžeme zde ale najít i nám bližší československý model – jadernou elektrárnu A1. Tato elektrárna byla spuštěna 24. října 1972 v Jaslovských Bohunicích. [14]

Do **druhé generace** řadíme především v současné době provozované jaderné elektrárny. Jedná se o doposud nejpočetnější skupinu. Patří sem například reaktory typu [14]:

- PWR/VVER – tlakovodní reaktor
- BWR – varný reaktor
- Candu – kanadský těžkovodní reaktor
- RBMK – kanálový varný reaktor

Pro názornost sem můžeme zařadit z našeho nejbližšího okolí jadernou elektrárnu Dukovany se čtyřmi reaktory typu V-213.

Třetí generace jaderných elektráren zůstala povětšinou jen na papíře. Nicméně i tak můžeme uvést příklad v podobě pokročilých lehkovodních reaktorů ABWR japonské elektrárny Kashiwazaki (pouze 6. a 7. blok). [13]

Následná generace jaderných elektráren principiálně vychází z předchozí generace, ale v jejím případě byly kladeny podstatně vyšší nároky například na jadernou bezpečnost. Bývá tedy označována, jako generace III+. Do této generace je možné zařadit typy, které byly zvažovány na dostavbu Temelína tři a čtyři. [13]

Poslední zatím uvažovanou generací jaderných elektráren je čtvrtá generace. Tyto projekty vychází z dlouhodobé koncepce, jež zahrnuje celé století. Tento přístup ke dlouhodobé udržitelnosti je v posledních letech opomíjen, ale pro energetiku je zásadní. Dále je třeba zmínit, že technologie čtvrté generace se netýká pouze jaderných reaktorů, ale celého palivového cyklu. I když původní předpoklady už zřejmě neplatí [10], přesto působí značně naléhavě. Uvažované zásoby jaderného materiálu v případě lehkovodních reaktorů (na nichž je současná jaderná energetika založena) by se značně ztenčily. [13]

Základní výzkum a dlouhodobé projekty jsou pro soukromý sektor obvykle poměrně neatraktivní. V této úloze by měl sehrávat hlavní úlohu stát. Konkrétně americká vláda dala podnět ke vzniku mezinárodního týmu expertů, kteří zastupují různé oblasti z technologie jaderných reaktorů – GIF (Generation IV International Forum) [15].

Úkolem této skupiny bylo navrhnout směr, jímž by se měl výzkum dále ubírat, a vybrat nejnadějnější metody a technologie. [13]

Prvním krokem skupiny GIF bylo jasné zformulování cílů, které by měla čtvrtá generace jaderných elektráren splňovat. Jedná se poměrně různorodý výčet názorů a cílů. Je zde značná pozornost věnována odpadům a proliferaci. Cíle byly prozatím stanoveny poměrně široce s očekáváním, že k jejich konkretizaci dojde až postupným vývojem [13]:

- Konkurenceschopnost jaderné energetiky v porovnání s dalšími variantami energetického mixu. Celková cena vyrobené kWh by neměla přesáhnout 3 cent/kWh v cenách r. 2000. Předpokládaná cena jaderné elektřiny ze současných projektů jaderných elektráren s ALWR (pokročilý lehkovodní reaktor) je o polovinu vyšší.
- Přiměřené investiční riziko srovnatelné s dalšími možnostmi investování, které nabízí trh. Konkrétně jsou jako příklad uváděny cílové investiční náklady na systémy Generace IV ve výši 1000 USD/kWe.
- Udržitelný rozvoj především ve formě maximálního využívání jaderného paliva a odpovídajícího nakládání s jadernými odpady.
- Krátká doba realizace. Celková doba od podepsání kontraktu do zahájení komerčního provozu elektrárny by neměla převýšit 4 roky. Doba výstavby od prvního položení betonu by neměla přesáhnout 3 roky.
- Nízká pravděpodobnost poškození aktivní zóny. NRC (americký výbor pro regulaci jádra) nyní požaduje pro ALWR dosažení hodnoty nižší než 5-10 reaktor-roků provozu. Mnozí odborníci věří, že tato hodnota je již dostatečně nízká. Cílem však je dosáhnout u čtvrté generace takové odolnosti proti poškození aktivní zóny, která by názorně demonstrovala další zdokonalení jaderné bezpečnosti oproti projektům ALWR.
- Demonstrace odolnosti proti těžkým haváriím. Navrhovaný systém musí prokázat, že žádná myslitelná iniciační porucha nepovede k těžkému poškození aktivní zóny a to na základě integrovaných reaktorových testů.

- Žádná nutnost havarijního plánování. Nebude existovat žádný věrohodný scénář, který by u reaktoru IV. generace vedl k havarijnímu úniku radioaktivních látek mimo jadernou elektrárnu.
- Princip ALARA (mezní náklady jaderné bezpečnosti) [16] musí být dodržen v celém palivovém cyklu po celou dobu životnosti jaderné elektrárny.
- Tolerance k selhání lidského faktoru.
- Přijatelné řešení pro všechny odpady.
- Souhlas veřejnosti s komplexním řešením problému odpadů.
- Minimální tvorba odpadů.
- Minimální možnosti proliferační.

Výběr padl na projekty, jež mají v průběhu dalšího vývoje největší šanci na splnění zadaných cílů (všechny projekty nemusí naplnit očekávání). Zároveň byl kladen důraz i na schopnost reaktorů/elektráren kromě elektřiny vyrábět i například vodík či dobře hospodařit s aktinidy. Celkově vzniklo 134 projektů, z nichž bylo po několika kolech v červenci roku 2002 vybráno šest nejperspektivnějších projektů [13]:

GFR (Gas-cooled Fast Reactor system) – rychlý reaktor chlazený plynem [17]

LFR (Lead-cooled Fast Reactor system) – rychlý reaktor chlazený olovem [18]

MSR (Molten Salt Reactor system) – reaktor chlazený roztavenou solí [19]

SFR (Sodium-cooled Fast Reactor) – rychlý reaktor chlazený sodíkem [20]

SCWR (Supercritical-Water-cooled Reactor system) – reaktor chlazený vodou s nadkritickým cyklem [21]

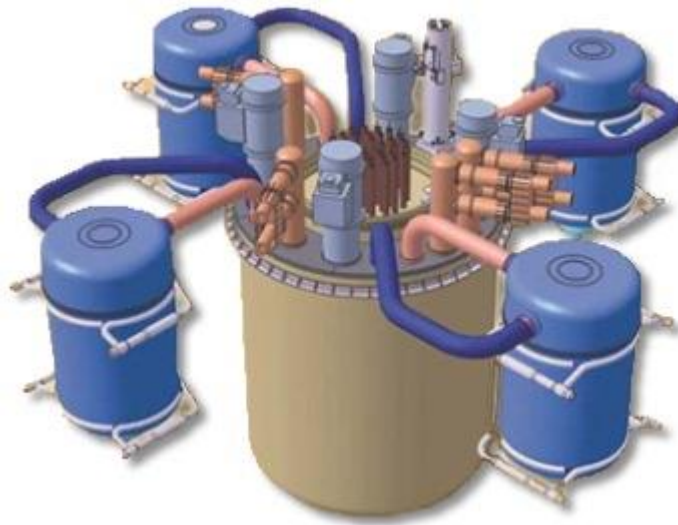
VHTR (Very-High-Temperature Reactor system) – reaktor s velmi vysokými teplotami [22]

Podrobnější popis šesti vybraných projektů se nachází v příloze.

3 Projekty rychlých reaktorů IV. generace v EU

3.1 Projekt ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)

Díky rozsáhlým zkušenostem s vývojem, výstavbou a provozem sodíkem chlazených rychlých reaktorů se původní orientace francouzské CEA z GFR obrátila na technologii SFR. Tedy z původního vývoje plynem chlazeného reaktoru, jenž byl předán zemím V4, na vývoj pokročilého sodíkem chlazeného reaktoru ASTRID. [23]



Obr. 7: Schéma ASTRID [23]

V příštím roce (2017) by mělo padnout definitivní rozhodnutí o výstavbě tohoto demonstračního modelu. Výstavba prototypu by měla započít již v roce 2020. Samotná technologická platforma rychlého sodíkem chlazeného reaktoru by měla být ověřena a připravena k zavedení v roce 2040. [23]

Plánovaný návrh demonstrační jednotky již počítá s výrobou elektrické energie, a to dokonce s výkonem 600MWe. Jedná se tedy o skutečný demonstrační model funkční jaderné elektrárny, kdy již samotná technologie SFR byla zvládnuta. [23]

Jako palivo bude využíváno recyklované plutonium (především MOX palivo) a transmutované aktinidy ve snaze snížit množství produkovaného jaderného odpadu a zachovat přírodní zdroje uranu. Využití MOX paliva bude podobné jako u reaktorů typu PWR, okolo 25-30% plutonia. S tímto palivem je pak počítáno i u komerčních

jaderných elektráren typu SFR s předpokládaným výkonem 1500MWe. Elektrárna je uspořádána do tří smyček, kde terciální smyčka využívá dusík v Braytonově cyklu. [23]

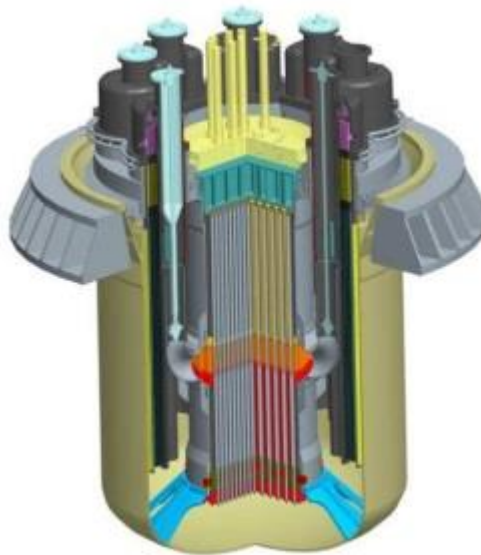
Na vývoji demonstrátoru ASTRID se podílí:

- Alstom: Energy conversion system
- Amec: Cooperation
- Areva: Steam supply, auxiliaries, instrumentation and control
- Bouygues: Civil engineering
- CEA: Project control, overall architecture, core and fuel design
- Coméx Nucleaire: Robotics and handling
- EDF: Project management, sharing operating experience
- Jacobs France: Common resources and infrastructure
- Rolls-Royce: Cooperation
- Toshiba: Large electromagnetic pumps

Po finanční stránce byl projekt ASTRID do roku 2015 majoritně financován francouzskou vládou, která na něj alokovala okolo 650 mil. € (uvolněno francouzskou vládou v září 2010). Pokud jsou započítány i náklady na projekt Jules Horowitz, jenž sloužil z velké části pro ověření technologie SFR, celkové náklady se zvýší přibližně o 250 mil. €. Od roku 2015 se na projektu ASTRID rovněž podílí Japonsko. Předpokládá se, že na výstavbu bude zapotřebí ještě 4286 mil. €, které budou pocházet z úvěrů evropských institucí, podpor EU a grantů (např. od ESNII - European Sustainable Nuclear Industrial Initiative). Navíc projekt získá 839 mil. € od soukromých investorů. [23]

3.2 Projekt ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator)

Druhým demonstračním modelem jaderné elektrárny nové generace, jehož vývoj financují státy Evropské unie, je reaktor ALFRED. Jedná se o rychlý olovem chlazený reaktor, jehož výstavba je plánována v Rumunsku. Na jeho vývoji spolupracují italská národní agentura pro nové technologie (ENEA) a rumunský ústav jaderného výzkumu (Institutul de Cercetari Nucleare – ICN). Dále pak konsorcium Falcon, fondy EU, evropské jaderné průmyslové iniciativy (ESNII) a další. Celkové náklady na projekt jsou odhadovány na 1 mld. €. [24]

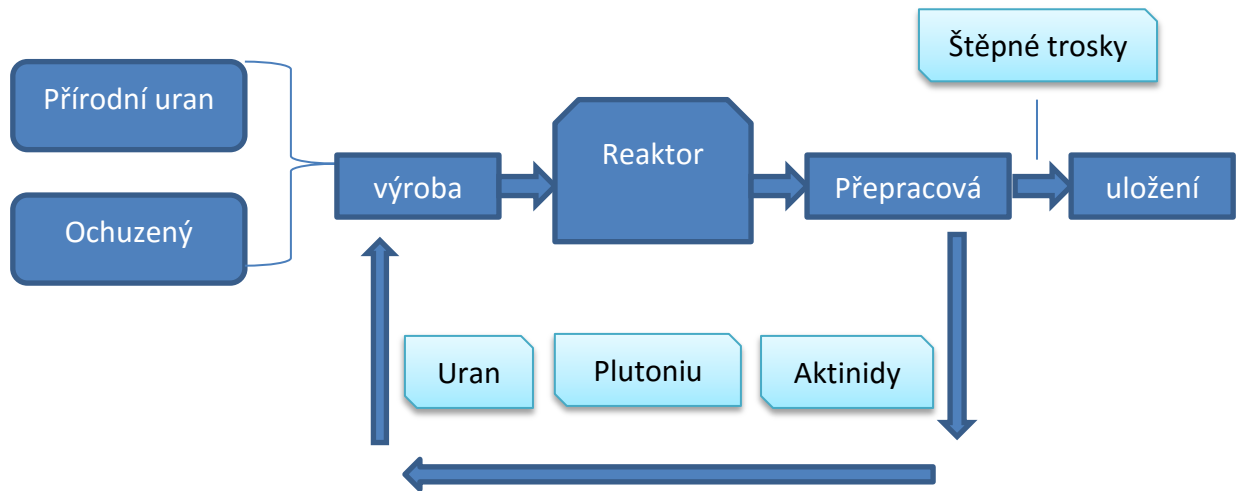


Obr. 8: Schéma ALFRED [24]

V současnosti probíhá druhá fáze – návrh zařízení. Od roku 2018 do 2022 bude následovat licencování a konečný návrh zařízení. Výstavba je plánována od roku 2022 do 2025 s předpokladem spuštění v roce 2025. Plánovaný výkon je 120–125MWe. ALFRED je navrhován jako demonstrační model pro ověření technologie, za kterým bude následovat průmyslová demonstrační jednotka ELFR o výkonu 600MWe. [24]

Pro ALFRED je plánováno využívat MOX palivo o obsahu plutonia 17 %. Zároveň je počítáno s 1 % paliva z recyklovaných aktinidů. Jedním z hlavních důvodů je ekonomická motivace, která tkví ve využití nejen přírodního uranu bez nutného obohacování už tak ze snižujících se zásob izotopu uranu 235, ale zároveň i využití

odpadní suroviny z procesu obohacování – ochuzeného uranu. Na následujícím schéma je vyznačen, již uzavřený, palivový cyklus. [25]



Obr. 9. Palivový cyklus ALFRED [26]

Na vývoji demonstrátoru se podílí:

- Ansaldo Nucleare, Italy
- National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), Italy
- Institute for Nuclear Research (RATEN-ICN), Romania
- ÚJV Řež, Česká republika
- Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia (CRS4), Italy
- Research and Development Services (SRS), Italy
- Interuniversity Consortium for Technological Nuclear Research (CIRTEN), Italy
- Institute Symlog de France (SYMLOG), France
- Nuclear Services for Energy, Environment & Health (NRG), The Netherlands
- Italian Institute of Technology (IIT), Italy
- University of Genoa (UniGE), Italy
- Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany
- Global Research for Safety (GRS), Germany
- LeadCold Reactors, Sweden

3.3 Projekt ALLEGRO

Demonstrátor ALLEGRO představuje návrh heliem chlazeného jaderného reaktoru s rychlým spektrem neutronů (GFR - Gas Fast Reactor) o výkonu 75 MWt. Tento typ reaktoru ve světě dosud nebyl postaven a neexistují žádné provozní zkušenosti. [27]

Historický kontext je v tomto případě velice důležitý. Po druhé světové válce se v elektroenergetice prosadil lehkovodní typ reaktorů (LWR) o velkém výkonu s turbínami na sytou páru a odpovídající (relativně nízkou) účinností. Plynem (zejména CO₂) chlazený a grafitem moderovaný reaktor sice stál na počátku éry elektroenergetiky, generoval ostrou páru s parametry uhelných elektráren, avšak malá hustota výkonu byla hlavní nevýhodou. Demonstrační (vysokoteplotní) heliem chlazené reaktory s palivem typu TRISO (tj. grafitem moderované) tuto nevýhodu neodstranily, jsou ale dnes jedinými v podstatě inherentně bezpečnými reaktory. [27]

Touha po parametrech páry v uhelných elektrárnách, možnost vysokého měrného výkonu, možnost spalovat ochuzený uran a minoritní aktinidy a zejména možnost generovat štěpitelné plutonium z U238 byla motorem vývoje (množivých) reaktorů s rychlým spektrem neutronů, tj. bez moderátoru. Proti tomu stály a stojí významné nevýhody [27]:

- Potřeba vysoce obohaceného uranového paliva nebo jeho náhrada plutoniem (nebezpečí zneužití pro vojenské účely)
- Nutnost přepracovat palivo
- Nemožnost použít vodní páru jako chladivo (špatné bezpečnostní a materiálové charakteristiky) a tudíž nutnost použít exotická chladiva (tekuté kovy, plyn,...)
- Složité provozní charakteristiky
- Zatím stále ekonomicky neschopné konkurovat komerčním LWR a PHWR

Navzdory těmto nevýhodám se řada zemí pokusila demonstrační jednotky rychlých reaktorů (chlazených sodíkem) provozovat. Některé od toho v 80. letech upustily (USA, Německo, Velká Británie), Rusko, Japonsko a Francie vytrvaly, Indie a Čína se dokonce do tohoto klubu dnes přidávají. Proč je dnes opět takový zájem o rychlé reaktory, když ekonomicky dnes ještě nemohou uspět?[27]

Odpověď nalezneme v současné politicko-ekonomické situaci a ve výsledcích dlouhodobého výhledu zásob uranu pro flotilu jaderných bloků LWR a PHWR. Shrňme základní fakta [27]:

1. Problematika týkající se oteplování planety Země (Římský klub) vede k expanzi velkého množství velmi malých zdrojů výroby elektřiny (vítr, slunce,...), což ohrožuje stabilitu sítě a paradoxně vede k nutnosti disponovat též stabilními velkými zdroji elektřiny (které musejí navíc uvedené malé zdroje zálohovat).
2. Navzdory cílenému útlumu „klasické“ jaderné energetiky v některých euro-atlantických zemích (Německo,...) je v jiných zemích (Indie, Čína, Jižní Korea,...) snaha stavět nové bloky, čímž stále roste spotřeba uranu (a obohacovacích kapacit).
3. Tento útlum jaderné energetiky v některých euro-atlantických zemích způsobuje hrozbu ztráty kontinuity know-how, kterým dnes ještě disponují konstruktéři ze 70. až 90. let (dnes jsou vesměs v důchodu).
4. Technicky neefektivní využívání uranu v otevřeném palivovém cyklu (pouze <2 % uranu je využito, zbytek se stává odpadem) zkracuje období levného uranu prakticky na několik desetiletí a generuje obrovské množství vyhořelého paliva, jež je nutno skladovat, přepracovat nebo trvale uložit.
5. V zemích, které disponují obohacovacími kapacitami, se naakumulovalo obrovské množství ochuzeného uranu (např. ve Francii kolem 500 000 tun). Tento „odpad“ je připraven stát se „levným“ zdrojem pro palivo rychlých reaktorů.

V současné době pozorujeme navzdory nelehké situaci v elektroenergetice (zejména v EU v dlouhodobých výhledech) tyto tendence [27]:

- Zajistit bezpečnost jaderných zdrojů
- Zajistit udržitelnost jaderných zdrojů, tj. připravit se na budoucí realizaci uzavřeného palivového cyklu založeném na flotile rychlých reaktorů.
- Minimalizovat množství radioaktivních odpadů, např. prostřednictvím přepracování paliva a spalování minoritních aktinidů v rychlých reaktorech.

Ignorování těchto signálů může v horizontu několika desetiletí způsobit nedostatek levného přírodního uranu a socio-ekonomické těžkosti v důsledku rostoucího množství vyhořelého paliva. Oba jevy nepochybně velmi sníží atraktivitu „klasické“ jaderné elektroenergetiky. [27]

Všechny výše uvedené důvody představují zřetelný argument, proč již nyní investovat do vývoje rychlých reaktorů. Na tento vývoj je k dispozici právě oněch několik desetiletí. Rychlé reaktory všech typů jsou stále zatíženy dosud nevyřešenými problémy, zejména souvisejícími s typem chladiva [27]:

- Reaktory SFR: Sodík prudce reaguje s oxidačním prostředím, zejména s vodní párou. I relativně malá netěsnost na sodíkovém okruhu, zejména parogenerátoru, může mít fatální následky. Zejména ve Francii panují obavy, zda veřejnost bude toto nebezpečí akceptovat. Navíc, chladivo není průhledné a pod teplotou 98 °C tuhne, což velmi komplikuje údržbu. Proto Francie podporuje též výzkum alternativní technologie, tj. heliem chlazeného rychlého reaktoru¹.
- Reaktory LFR: Olovo obsahující nečistoty (kyslík,...) působí korozivně na konstrukční materiály, což spolu s poměrně vysokou teplotou tavení a neprůhledností též způsobuje provozní těžkosti. Navíc, vysoká měrná hmotnost chladiva může být v případě zemětřesení pro velký energetický reaktor fatální.
- Reaktory GFR: Helium má malou objemovou tepelnou kapacitu (je to plyn), což zvyšuje nároky na odvod tepla z aktivní zóny. Zejména poruchy chlazení spojené s únikem chladiva mohou být pro špatně navržený reaktor fatální. Navíc, utěsnit objemy obsahující helium je technologicky náročné (např. v situacích při výměně paliva).

Je vidět, že každý z uvedených systémů trpí nějakou inherentní „vadou“. Protože dnes není snadné prorokovat, který systém bude bezpečnostně, provozně a ekonomicky nejlepší, je nutné je prověřit v praxi všechny. Historicky je z hlediska technologie nejdále systém SFR, protože demonstrační jednotky jsou již v provozu. Tato

¹ prohlášení ředitele CEA v 06/2010

technologie přestala být v ÚJV Řeži (ČR) podporována, ale začala být podporována technologie GFR vyvinutá v CEA ve Francii. [27]

ÚJV Řež se od roku 2010 angažuje v návrhu demonstrátoru GFR ALLEGRO. Podrobnosti k této technologii, její výhody a zejména podrobnosti k projektu ALLEGRO jsou uvedeny v dalších podkapitolách. [27]

Koncepty demonstrátoru ALLEGRO

Koncept ETDR CEA (2008)

Tento koncept demonstrátoru GFR byl vyvíjen s cílem testovat inovativní vysokoteplotní keramické palivo a proveditelnost technologií GFR, zaměřené zejména na primární okruh bez nutnosti simulovat další charakteristiky energetického GFR2400 [27]:

- Fyzika aktivní zóny a palivo, systém řízení reaktoru
- Systémy pro odvod zbytkového tepla
- Systém pro výměnu paliva
- Ostatní komponenty, měření apod.



Obr. 10. Výsledkem návrhu je koncept ETDR, který nese základní znaky pozdějšího dvousmyčkového demonstrátoru ALLEGRO. [28]

Zástupci CEA potvrdili [29], že jejich cílem bylo [27]:

- prokázat proveditelnost projektu zejména z hlediska fyziky aktivní zóny (AZ) s dvojitým typem paliva (trojitým typem uspořádání),
- prokázat použitelnost paliva typu MOX ze sodíkového programu pro přechodné použití v demonstrátoru GFR jako „driver core”
- prokázat uchlazitelnost při výpadku odvodu tepla pomocí systému odvodu zbytkového tepla (decay heat removal – DHR),
- nekomplikovat technické řešení
- získat pomocné heliové technologie (např. systémy čištění helia), pokud možno, s minimem nákladů ze světa HTR,
- mařit výkon reaktoru přes vodní sekundární okruh a výměník voda/vzduch do ovzduší.

Koncept ETDR se vyznačuje následujícími charakteristickými znaky a parametry [27]:

- Ocelová reaktorová nádoba s průtokem helia při tlaku 7 MPa aktivní zónou směrem nahoru.
- Primární okruh uzavřen v ocelové tlakové obálce válcového tvaru pro případ havárie s únikem chladiva, čímž se zajistí tlak plynu cca 0,3–0,4 MPa, dostatečný pro odvod tepla nucenou konvekcí.
- První AZ s palivem typu MOX:
 - Hexagonální obálkové palivové soubory odvozené ze sodíkového programu (palivové tyče distancované ocelovým drátem, tablety MOX s obsahem plutonia cca 25 % v ocelových trubkách).
 - Průměrná teplota primárního helia na vstupu/výstupu z aktivní zóny typu MOX: 260/530 °C.

- Druhá AZ s vysokoteplotním keramickým karbidovým palivem (ve vývoji)[27]:
 - Hexagonální obálkové palivové soubory, palivové tyče distancované mřížkami, (tablety (U, Pu)C s obsahem plutonia cca 25 % v keramických trubkách SiC_f-SiC).
 - Průměrná teplota primárního helia na vstupu/výstupu z aktivní zóny s keramickým palivem: 400/850 °C.
- V AZ typu MOX je šest pozic pro testování zkušebních palivových souborů s keramickým palivem. Výstupní teplota 850 °C je zajištěna snížením průtoku kazetou (na vstupu 260 °C).
- Řídící tyče procházejí dnem reaktorové nádoby.
- Jeden výměník helium/voda spojený s reaktorovou nádobou koaxiálním potrubím (horká větev uvnitř).
- Systém pro odvod zbytkového tepla pomocí tří výměníků spojených s reaktorovou nádobou koaxiálním potrubím. Umístění vysoko nad aktivní zónu bylo zvoleno pro maximalizaci přirozené konvekce v případě výpadku hlavního dmychadla i dmychadel DHR.
- Výměna paliva manipulátorem spuštěným potrubím skrz otvor v horním víku reaktoru (patentovaný systém).
- Reaktorová nádoba je uchycena v betonové šachtě, popř. alternativně v ocelovém koši.

Zveřejněné informace o konceptu jsou pouze malou částí práce, která byla v CEA [30] provedena v rámci vývoje GFR2400 a jeho demonstrátoru. V období kolem roku 2006 se vývoji GFR2400 a ALLEGRO věnovalo až 200 lidí (včetně vývoje keramického paliva). Celkové množství práce na tématu GFR mezi roky 2001-2009 je odhadované na 800 člověko-roků. [27]

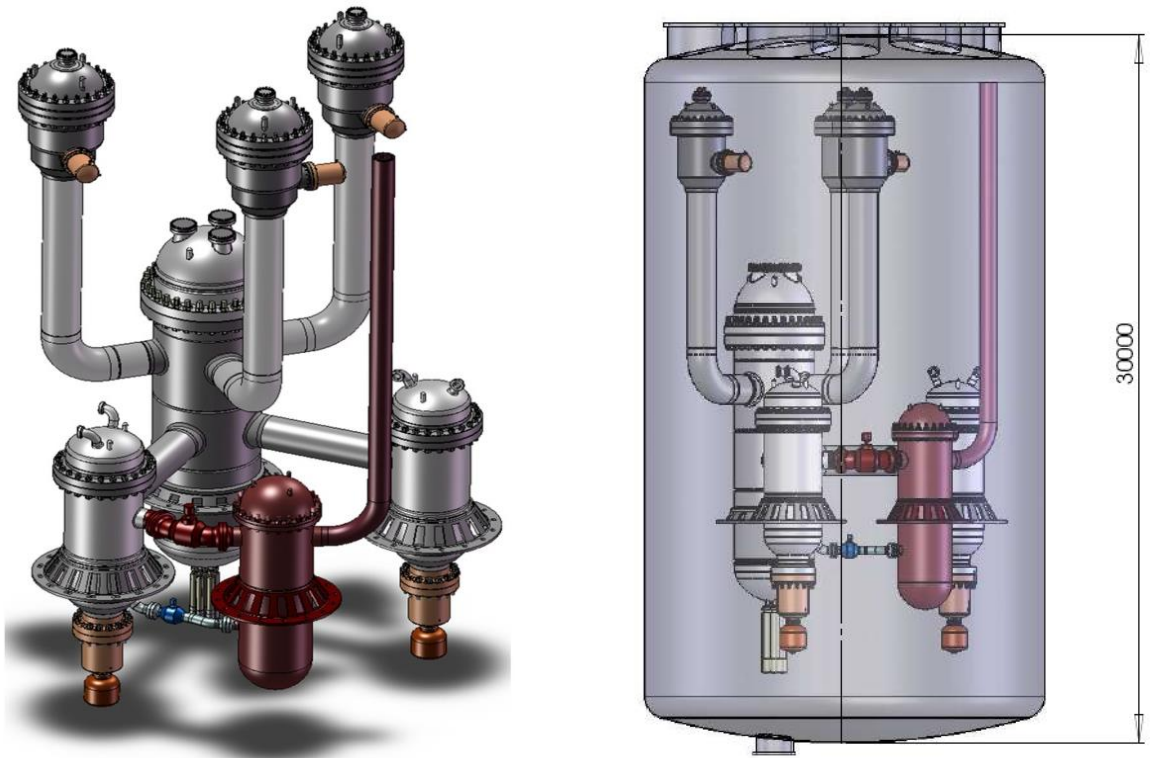
Hlavní pozornost byla věnována tepelnému schématu, fyzikálnímu návrhu aktivní zóny, konstrukčnímu návrhu hlavních komponent a termohydraulickému posouzení uchladielnosti v provozních a havarijních podmínkách. Nosné (vesměs betonové) konstrukce byly sice navrženy, avšak informací o nich je velmi málo. Tlaková obálka

byla navržena s ohledem na optimalizaci tlaku v obálce při havárii s únikem primárního chladiva. Ostatní aspekty konceptu byly řešeny jen okrajově. [27]

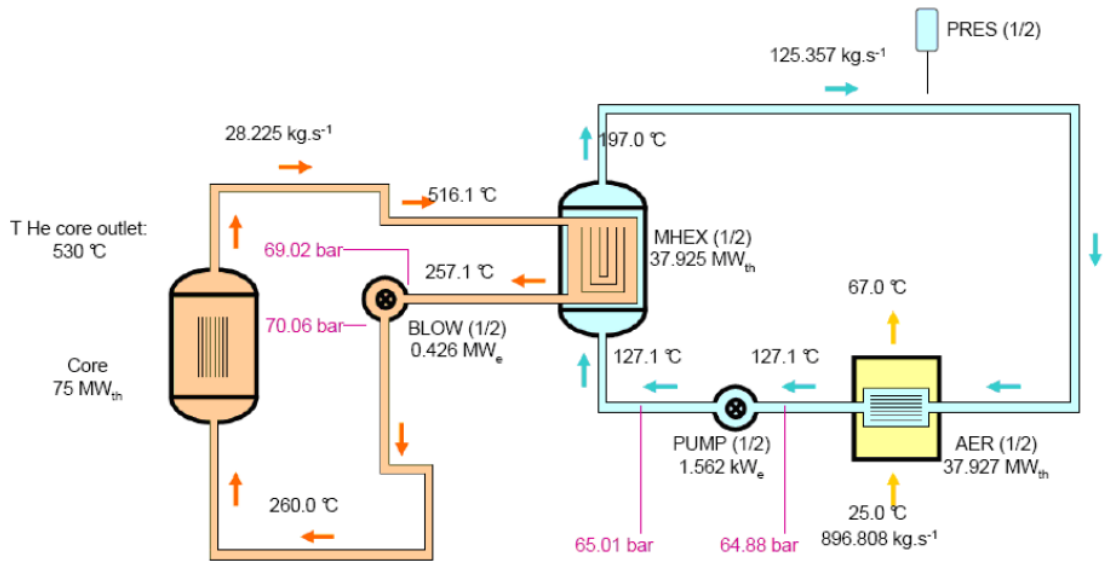
Koncept ALLEGRO CEA (2009)

Úprava konceptu ETDR na koncept ALLEGRO (Obr. 11) byla v podstatě rutinní činností a spočívala v přepočtu celého systému na nové parametry se zachováním rozměrů palivových souborů [27]:

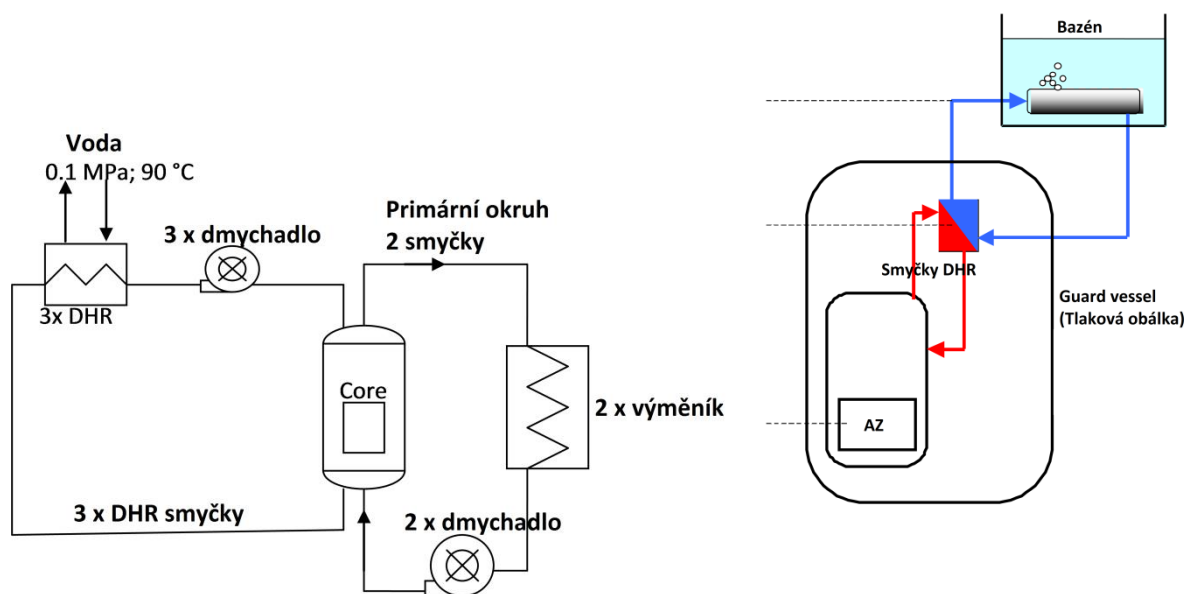
- Byl zvýšen výkon reaktoru z 50 na 75 MWt přidáním dalšího věnce palivových souborů. Větší AZ (aktivní zóna) vykazovala lepší neutronovou ekonomii. Rozměry celého demonstrátoru se tímto krokem zvětšily.
- Byla přidána další primární cirkulační smyčka pod úhlem 90° a byl změněn výměník helium/voda z 50 na 37,5 MWt (celkově 75MWt). Tepelné schéma pro AZ typu MOX je na Obr. 12.
- Byl přidán přídatný výměník pro vytažení 10 MW tepla ven z primárního okruhu pro technologické účely. Provedení tohoto výměníku není k dispozici, jeho vliv na souměrnost obou primárních smyček nebyl proveden (není k dispozici).
- Byly upraveny výměníky DHR včetně umístění dmychadel DHR (nyní ze strany). Princip systému DHR je na Obr. 13.
- Koaxiální potrubí k primárnímu výměníku a potrubí k výměníku DHR má stejné rozměry.
- Byly upraveny rozměry tlakové obálky.



Obr. 11: CEA ALLEGRO (2009): Primární okruh se systémy DHR v ocelové obálce. [28]



Obr. 12: CEA ALLEGRO (2009): Parametry I. a II. okruhu pro verzi s palivem MOX. [28]



Obr. 13: CEA ALLEGRO (2009): Systém pro odvod zbytkového tepla (DHR). [28]

Primární okruh

Priority demonstrátoru ALLEGRO nebyly směřovány na simulaci charakteristik velkého GFR2400 ale „jen“ na testování paliva (a systémů s tím spojených) a systému DHR v prostředí helia. Symetrie tří primárních smyček v GFR2400 se tudíž v demonstrátoru ALLEGRO neobjevila. Toto lze považovat za zbytečnou komplikaci demonstrátoru. [27]

Dvousmyčkové ALLEGRO s primárními smyčkami umístěnými pod úhlem 90° vykazují výraznou asymetrii nejen ve válcové tlakové obálce, avšak též z hlediska chlazení vnitřního povrchu reaktorové nádoby heliem z chladné větve vracující se do nádoby. Vliv této asymetrie na chlazení reaktorové nádoby ani vliv asymetrie umístění reaktorové nádoby v tlakové obálce nebyl analyzován. [27]

Reaktorová nádoba a tlaková obálka jsou dvě komponenty fixně upevněné do betonových struktur. Existují ale komponenty (např. potrubí pro chlazení DHR,...), které budou napojeny na primární okruh a zároveň budou procházet tlakovou obálkou. Velké dilatace těchto souvisejících komponent a požadavek na těsnost tlakové obálky budou vyžadovat speciální technické řešení, které dosud nebylo navrženo. [27]

Aktivní zóna

Palivo (U, Pu)O₂ (MOX)

Použití tohoto typu paliva, vyvinutého a optimalizovaného pro chlazení tekutým kovem, pro odvod tepla z těsné mříže do helia vyžaduje pečlivé experimentální prověření. Je nebezpečí, že teplotní nerovnoměrnosti budou lokálně generovat horká místa, která se v provozních (a zejména abnormálních) podmínkách mohou příliš blížit akceptačním kritériím. Tento experimentální program byl v CEA v roce 2009 přerušen. Byl postaven a otestován pouze vyhřívaný stend (zkušební zařízení) pro testování odvodu tepla ze svazku paliva MOX do vzduchu (ESTHAIR v CEA Grenoble). Stend s heliem na prototypických parametrech pro tento typ paliva byl sice v CEA navržen (ESTHEL) ale dosud nebyl postaven. [27]

Palivové tyče MOX distancované drátem v reaktorech chlazených sodíkem používají hladké ocelové trubky. Pro přenos tepla do plynu, např. helia, hladká trubka není výhodná. Výhodné je použít vroubkování, které zvyšuje intenzitu přestupu tepla. [27]

Palivo (U, Pu)C

Vývoj keramického paliva byl v CEA rovněž přerušen. Pokračují pouze aktivity spojené s aplikací trubek SiC-SiC pro tlakovodní popř. sodíkové reaktory. Obecně je nutné zajistit plynotěsnost a možnost uzavřít keramickou trubku zátkou. Pro doplnění je vhodné uvést, že se počítalo s použitím distančních mřížek z vanadiové slitiny popř. materiálu NbZrC z kosmického programu. [27]

Jedním z jevů typických pro GFR (identifikovaných v projektu FP7 GoFastR) je nebezpečí úbytku keramického materiálu v důsledku jeho vystavení proudu horkého helia, tj. generování prachu karbidu křemíku. Odstraňování produktů štěpení (netěsná trubka) a křemičitého prachu je úlohou pro systém čištění primárního helia. [27]

Vzhledem k tomu, že jsou plánovány pouze tři palivové vsázky pro vyzkoušení technologie, nebudou proto zahrnuty do provozních nákladů.

Systémy skladování a čištění helia

Analogické systémy již existují a jsou provozované na reaktorech V/HTR v Číně a v Japonsku. Hrubý odhad systému skladování a transportu helia pro ALLEGRO v CEA existuje, ale není jisté, že se tyto systémy do navržené tlakové obálky vejdou. [27]

Obzvláště nejistá situace panuje kolem systému čištění primárního helia. Na reaktorech V/HTR existují systémy pro odstraňování neaktivních nečistot (uhlíkový prach, organika, voda, vodík, CO, CO₂, apod.). Nízké uvolnění aktivity z TRISO paliva do helia nevyžaduje použití speciálních metod, navíc většina aktivity se nachytá na uhlíkovém prachu, který funguje jako objemový zachytávač. [27]

V reaktoru GFR s palivem v trubkách (ocelových či keramických) je situace méně příznivá. Netěsnost palivové trubky může způsobit uvolnění mnohem větší aktivity do plynu, než v reaktorech V/HTR a TRISO paliva. Navíc v GFR chybí zmíněný uhlíkový prach. Systém čištění plynu proto bude muset být dimenzován na odstraňování typických plynných i neplynných produktů (Xe, Kr, I, Cs, Sr,...). Bude-li ALLEGRO sloužit zejména pro testování nového typu paliva, je nezbytné očekávat zvýšený výskyt netěsností, tudíž vyšší uvolněnou aktivitu. Systém čištění helia proto bude muset být pro tyto účely náležitě dimenzován. [27]

Tlaková obálka (guard vessel)

Tlaková obálka GFR2400 má kulový tvar, tlaková obálka demonstrátoru ALLEGRO s tloušťkou stěny 40-50 mm má válcový tvar. Tento rozdíl neumožní získat zkušenosti s technologií kulového tvaru. Uzavření primárního okruhu do tlakové obálky komplikuje údržbu, opravy a výměnu komponent. Tlaková obálka by měla být ukotvena svým dnem do betonové struktury. Další betonové struktury (šachta reaktoru, boxy pro výměníky, ventilaci a heliové technologie) by měly vzniknout uvnitř tlakové obálky. [27]

Sekundární okruh

Voda jako chladivo sekundárního okruhu byla ověřena v technologii HTR a VHTR. Nicméně nebezpečí průniku významného množství vody netěsností hlavního výměníku helium/voda do primárního okruhu může být fatální z hlediska poškození technologie

(koroze, izolace,...). Existuje též obava vzniku varu na sekundární straně v abnormálních podmínkách (při ztrátě proudění vody). [27]

Koncept ALLEGRO CEA (2011)

V únoru 2010 byla ze strany CEA podána přihláška patentu, který rámcově řeší zajištění odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny reaktoru GFR v dispozici provedení GFR2400 při výpadku chlazení. Patent pod číslem WO 2011/104446 A1 byl mezinárodně publikován 1. září 2011.

Podstatou patentu je turbosoustrojí v sekundárním okruhu (směs helium/dusík nebo čisté helium), které je hřídelí spojeno s dmychadlem primárního okruhu, viz Obr. 14. Konkrétní tepelné schéma pro ALLEGRO s AZ MOX je na Obr. 15. Při výpadku chlazení (např. při havárii se ztrátou primárního chladiva nebo při totální ztrátě elektrického napájení) je pro zajištění kontinuity chlazení AZ využito setrvačnosti turbosoustrojí, které dále pro svůj pohon využívá zbytkové teplo, generované aktivní zónou a do II. okruhu přenášené primárním výměníkem plyn/plyn. Otáčky turbosoustrojí postupně klesají a sekundární okruh je postupně odtlakován. Výpočty naznačují, že tímto způsobem lze zajistit odvod zbytkového tepla po dobu až cca 50 000 s. Po této době musí chlazení zajistit systém havarijních výměníků pro odvod zbytkového tepla buď přirozenou konvekcí (dmychadla DHR nejsou k dispozici avšak I. okruh je na plném tlaku) nebo nucenou konvekcí v případě ztráty primárního chladiva. V takovém případě musí být k dispozici dmychadla DHR.

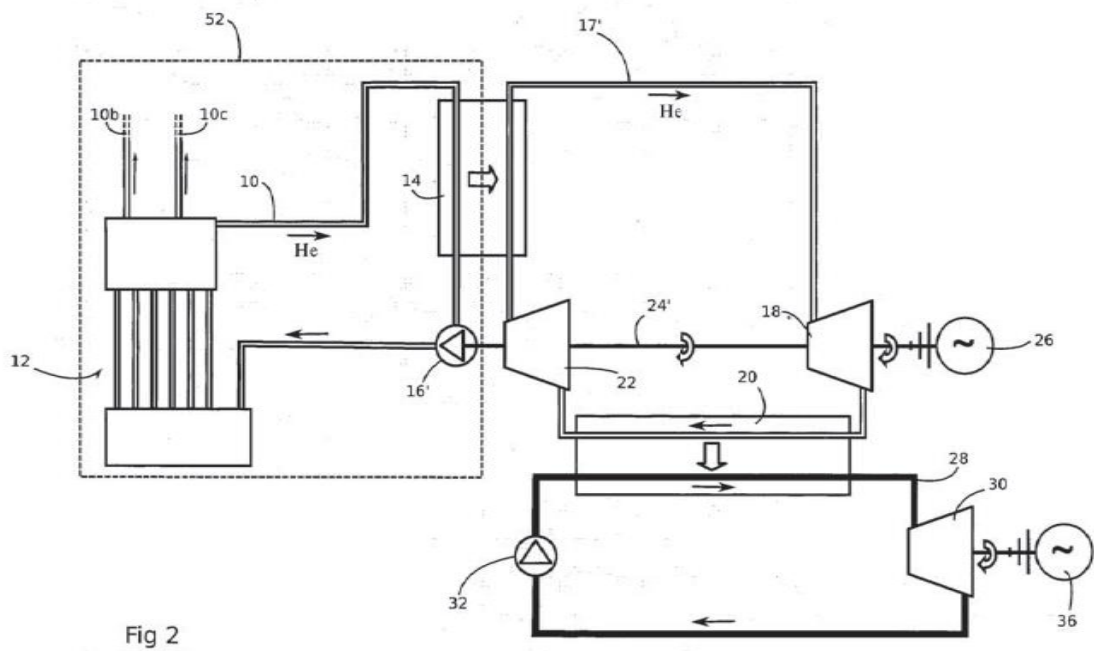
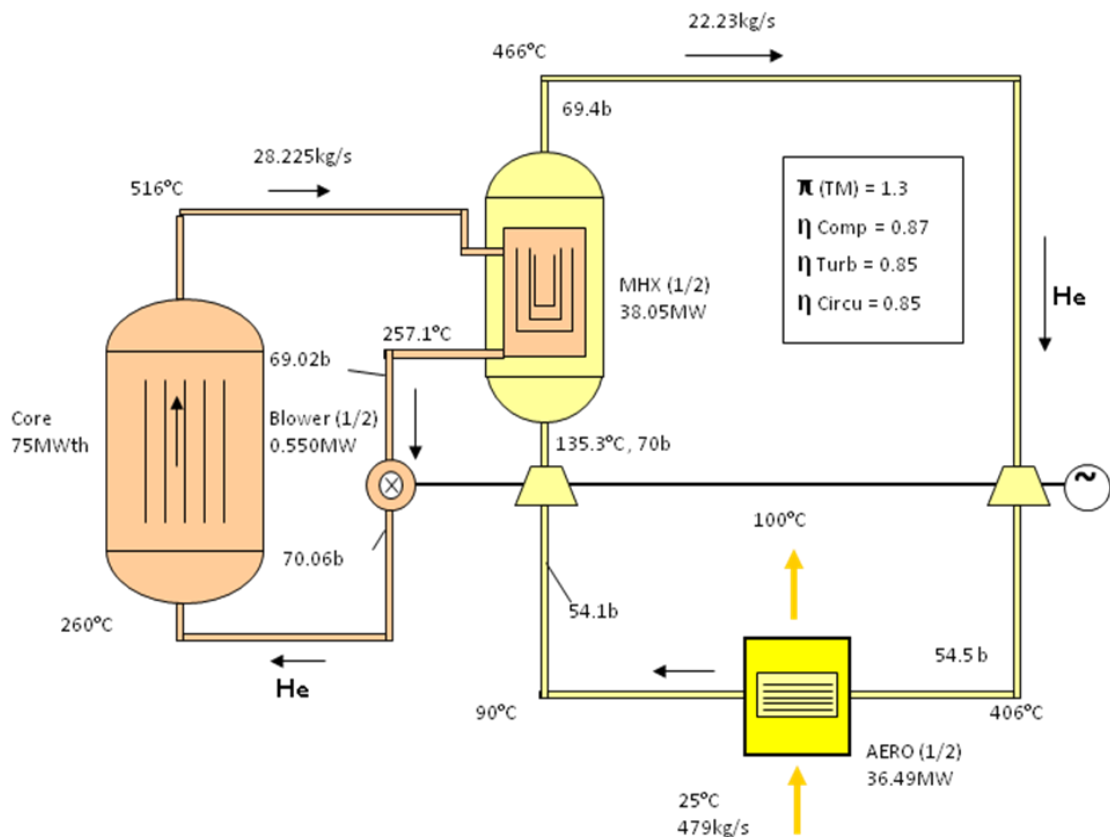


Fig 2

Obr. 14 – Systém pro odvod zbytkového tepla (DHR)



Obr. 15 – Tepelné schéma pro palivo MOX

Podmínkou funkčnosti tohoto patentu je zamezení neplánovaného zastavení turbosoustrojí v průběhu dochlazování např. v důsledku zadření ložisek. Patent je podložen teoretickými výpočty systémovým termohydraulickým kódem CATHARE, avšak nehovoří o konstrukčním provedení napojení pohonu primárního dmychadla na turbosoustrojí ani o proveditelnosti a spolehlivosti turbosoustrojí. Výsledná odolnost tohoto řešení proti roztavení AZ v důsledku poruchy turbosoustrojí není k dispozici.

Toto řešení je konstrukčně velmi složité a vyžaduje mít k dispozici bezpečnostně kvalifikované turbosoustrojí.

Koncept ALLEGRO V4G4 (2013)

Koncept V4G4 je modifikací konceptu ALLEGRO (2009). Je veden motivací zvýšit bezpečnost demonstrátoru. V současné době jasně definovaná podoba tohoto konceptu neexistuje. Navrhovaná modifikace spočívá v následujících bodech:

- Změna chladiva v sekundárním okruhu z vody na plyn.
- Přesunutí výměníku pro technologické teplo z I. do II. okruhu.

Terciální okruh slouží pouze k maření energie v chladiči plyn/vzduch nebo plyn/voda.

Výhody tohoto řešení jsou následující:

- Odstranění rizika průniku sekundární vody do primárního okruhu a tím snížení jak rizika technologického poškození popř. zničení reaktoru, tak rizika nadkritičnosti reaktoru v důsledku průniku nadlimitního množství moderátoru do AZ.
- Snížení rizika průniku technologického plynu do primárního okruhu.

Nevýhody tohoto řešení jsou následující:

- Nutnost vyvinout hlavní výměník helium/plyn.

- Snížení teploty technologického plynu o teplotní rozdíl mezi I. a II. okruhem.

Provedení konceptu V4G4 (2013) je v současnosti v řešení. Je možné, že CEA a někteří partneři V4G4 budou požadovat realizaci konceptu ALLEGRO (2011) s turbosoustrojím v sekundárním okruhu.

Organizace a řízení projektu ALLEGRO

Existují tři období, v nichž řízení projektu ALLEGRO probíhalo (probíhá) různě [27]:

- Období, kdy vše řídila CEA (2001 - 2010).
- Období bez dominantní právnické osoby (2010 - 2013).
- Období řízené asociací V4G4 Centrum of Excellence (2013 – cca 2020).

Původní Přípravná fáze projektu ALLEGRO byla plánována na období 2010-2012, na konci tohoto období byla prodloužena o rok. V průběhu roku 2013 došlo ke kvalitativní změně vztahů mezi partnery projektu (viz další podkapitola). [27]

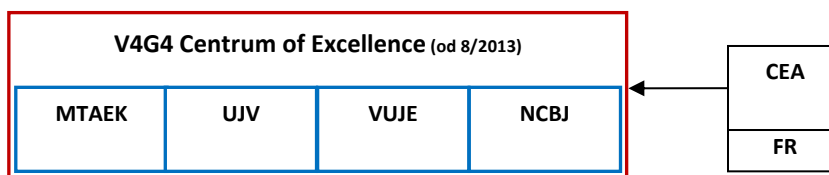
Přípravná fáze projektu ALLEGRO (8/2013 – cca 2020)

Toto (současné) období je charakterizováno vznikem zájmového sdružení právnických osob „V4G4 Centrum of Excellence“ (dále jen V4G4), registrované na Slovensku dle právního řádu Slovenské republiky, viz Obr. 16. Členy jsou MTAEK (Maďarsko), ÚJV (ČR), VUJE (SR) a NCBJ (Polsko). Uzavření asociační smlouvy V4G4 s CEA proběhlo začátkem roku 2014. [27]

Projekt ALLEGRO je prozatím jediná aktivita V4G4. Členové sdružení se rozhodli v tomto projektu podělit o témata, za která budou zodpovědní následovně [27]:

- Pilíř 1 - VUJE: Design & Safety
- Pilíř 2 - ÚJV: Heliové technologie a experimentální podpora
- Pilíř 3 - MTAEK: Palivo
- Pilíř 4 - NCBJ: Materiály

Hlavním konstruktérem (General designer) demonstrátoru ALLEGRO v rámci V4G4 je VUJE.



Obr. 16: Schéma řízení aktivit ALLEGRO v období řízeném V4G4 (8/2013 – cca 2020). [27]

Financování projektu ALLEGRO

Projekt ALLEGRO byl financován zejména ze zdrojů CEA. Po změně strategie na francouzské straně v roce 2009 (přesun kapacit z GFR do technologie SFR) práce na GFR/ALLEGRO byly v podstatě přerušeny. Výjimkou byl projekt FP7 GoFastR v období 2010-2013. Na straně zemí V4 je financování projektu lokálními vládami zcela minimalistické s výhledem na větší finance pouze ze zdrojů EU. [27]

V období 2001 – 2012 byl projekt ALLEGRO financován především ze zdrojů CEA a částečně z Rámcových programů EU. CEA vynaložila na vývoj technologie GFR v období 2001 až 2009 odhadem téměř 800 človeko-roků. V důsledku rozhodnutí v roce 2009 přesunout kapacity z GFR do SFR byly skutečné kapacity a výdaje po roce 2009 (včetně) v porovnání s plánem bezpochyby výrazně redukovány. Ze zdrojů EU byly financovány tři projekty s celkovou dotací 5.25 M€, viz Tabulka 1. [27]

Tabulka 1: Financování projektů EU zaměřených na GFR (včetně ALLEGRO) v období 2001-2012. [27]

Projekt	FP5 GCFR 9/2000 – 8/2002	FP6 GCFR STREP 3/2005 – 2/2009	FP7 GoFastR 5/2010 – 4/2013	CELKEM 9/2000 – 4/2013
Celkové náklady [M€]	0.50	3.6	5.4	9,5
Dotace EU [M€]	0.25	2.0	3.0	5.25

ÚJV se prvních dvou projektů neúčastnil, v projektu GoFastR figuroval na rozdíl od MTAEK jako přidružený člen bez dotace (podobně jako VUJE). [27]

Financování v období 2013-2020 (současný stav)

V tomto období probíhá Přípravná fáze projektu s cílem připravit podklady pro rozhodnutí, zda v realizaci demonstrátoru (R&D, konstrukce, stavba) pokračovat či nikoliv. Toto období je charakterizováno značnou roztříštěností a nedostatečností finančních zdrojů pro pokračování ve vývoji technologie GFR/ALLEGRO. Finanční podpora ÚJV z veřejných zdrojů EU a ČR pokrývá v ÚJV v současné době kapacitu cca 2 človo-roků ročně.

Finanční zdroje

Vlastní zdroje zemí V4 Střední Evropy pro financování celého projektu V4G4 ALLEGRO (řádově několik desítek miliard Kč) zcela jistě nejsou a blízké době ani nebudou k dispozici. Země V4 Střední Evropy tudíž, s největší pravděpodobností, nebudou schopny celý projekt samy ALLEGRO financovat. [27]

SET-Plan předpokládá pro realizaci demonstrátorů rychlých reaktorů SFR, LFR a GFR (podporovaných iniciativou SNETP/ESNII) alokaci významných zdrojů EU, bez kterých se zejména projekt ALLEGRO neobejde. Je velmi pravděpodobné, že tyto zdroje nebudou uvolněny před rozhodnutím demonstrátor ALLEGRO skutečně postavit. Do té doby bude probíhat přípravná fáze projektu, která bude též vyžadovat nemalé prostředky zejména na výzkum a vývoj všech důležitých kapitol (palivo, materiály, technologie GFR,...). [27]

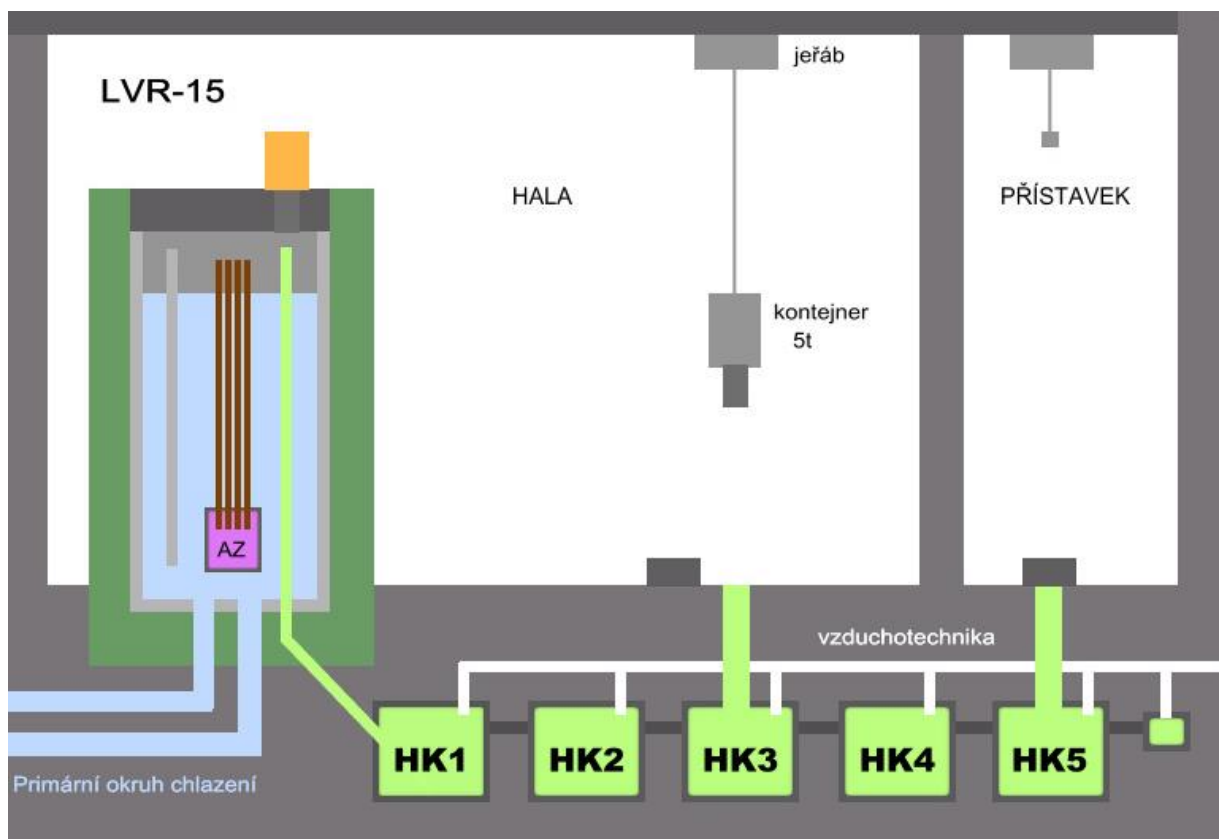
Shrnutí

- Země V4 Střední Evropy jsou schopny technicky realizovat demonstrátor ALLEGRO kromě výzkumu, výroby a přepracování paliva.
- Země V4 Střední Evropy nejsou schopny realizovat demonstrátor ALLEGRO finančně bez pomoci cizích zdrojů (EU, Francie,...). V rámci Přípravné fáze:
 - jsou schopny finančně realizovat pouze teoretické analýzy.
 - nejsou schopny z vlastních zdrojů realizovat návrh, stavbu a provoz experimentálních zařízení.
- Uvažovaná lokalita pro demonstrátor ALLEGRO existuje v Jaslovských Bohunicích na pozemku V1.
- Provoz demonstrátoru bude charakterizován těmito skutečnostmi:

- Jiný druh radioaktivních odpadů (filtry,...) než z reaktorů PWR (nutnost speciálních postupů).
 - Komplikace spojené s přepravou vyhořelého paliva s významným obsahem plutonia.
- Verze konceptu bez generování tržeb z výroby elektřiny nebo jiných služeb bude vyžadovat ročně významnou finanční dotaci na provoz. Původní odhad z ÚJV činil min. 145 mil. Kč za rok. Zde navazuje tato práce, kde je snaha tuto částku upřesnit a její odhad podložit strukturovaným výpočtem.

4 Možnosti samofinancování demonstrátoru ALLEGRO

Většina zařízení, jež disponuje výzkumným nebo experimentální reaktorem, patří pod správu výzkumných nebo vzdělávacích institucí. Většina takových reaktorů byla stavěna v minulosti. Jejich účelem bylo například ověření technologií pro nově vznikající jaderné elektrárny, návržení postupů nebo materiálový výzkum. Většina takovýchto reaktorů v současné době již nedisponuje unikátními parametry (například vysoká hustota toku neutronů). Došlo tedy k uvolnění kapacit dříve určených výhradně pro výzkumné účely. Zároveň jsou takováto zařízení velmi nákladná na provoz a samofinancování se tak stává nutností pro vlastní přežití. Provozovatelé těchto zařízení zareagovali na potřeby trhu a snaží se nabízet své kapacity nejen pro výzkumné, ale i pro komerční účely. Jejich portfolio lze rozdělit do dvou skupin: výroba a služby.



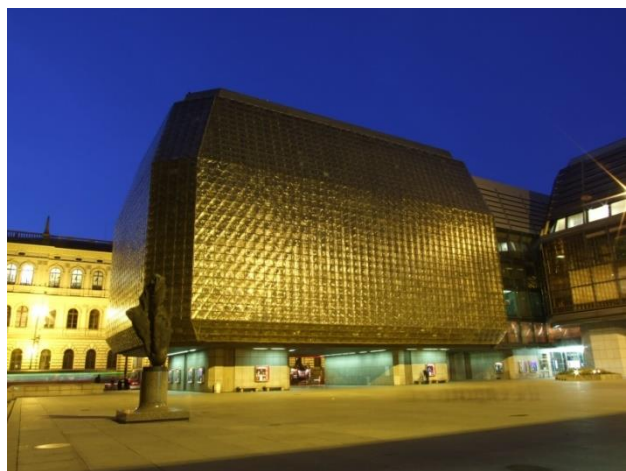
Obr. 17: Schéma horkých komor při LVR-15 [31]



Obr. 18: Pohled do horké komory [31]

První skupinu charakterizuje přímo činnost, kdy reaktor něco vyrábí. Je tedy možné mluvit o ozařování různých materiálů, ať už kvůli gama záření nebo spíše neutronům. Příkladem takovéto obvyklé činnosti je ozařování monokrystalu křemíku pro výrobu (dopování) polovodičů. Další možností je výroba radiofarmak a jiných radioizotopů, ať už pro průmyslové defektoskopické zářiče či obyčejné detektory kouře. Zajímavou možností je radiační barvení kamenů, i když se tato procedura v Evropě většinou neprovádí. Princip spočívá v ozáření polodrahokamu nebo drahokamu, ten následně změni barvu na vzácnější a dražší odstín. Velmi užitečná může být neutronová aktivační analýza. Předmět neznámého složení se nechá ozářit tokem neutronů. Následně vzniknou méně stabilní izotopy stabilních prvků, z kterých se daný předmět skládá. Jimi uvolňované záření je zachyceno a podle příslušného spektra přiřazeno konkrétním mateřským prvkům. Tato technologie se velmi dobře osvědčila při datování archeologických nálezů, eventuálně k odhalování jejich falzifikátů. V případě medicínských aplikací stojí také za zmínku bórová záchytová terapie [32]. Méně náročnou možností může být kontrakt, kdy zařízení zůstane v záloze pro případ poruchy nebo odstávky jiného reaktoru.

Tato skupina poskytovaných služeb vyžaduje dvě nutné podmínky parametrů reaktoru. Za prvé je nutný stabilní výkon a za druhé je nutné alespoň část aktivní zóny „obnažit“ pro kanály sloužící k vývodu paprsku záření. Vzhledem k tomu, že se u zařízení ALLEGRO jedná o demonstrační jednotku, alespoň v prvních letech, nelze počítat se stabilním výkonem. Rovněž vývody paprsku záření jsou vzhledem k umístění reaktoru do ochranné obálky guard vesselu a následně do kontejnmentu technicky neřešitelné. V případě vkládání vzorků přímo do reaktorové nádoby (například svědečný program) je tato možnost omezena pouze na případy, kdy bude aktivní zóna odtlakována z důvodu údržby.



Obr. 19: Příklad využití vyvedeného ionizujícího záření z reaktoru [31]

Druhou skupinou jsou služby. Do této skupiny je možné zahrnout poskytování času nebo zázemí pro experimenty využívající neutronové svazky vyvedené z aktivní zóny reaktoru. Velmi časté je poskytování zařízení pro výuku studentů nebo výcvik budoucích zaměstnanců jaderných zařízení. Velmi častá je také spolupráce se školami, ať už s tuzemskými nebo se zahraničními. Dále se pak zařízení snaží navazovat vztahy s průmyslovými podniky, s mezinárodní atomovou agenturou MAAE (International Atomic Energy Agency - IAEA) nebo slouží jako podpůrné zařízení pro řešení různých problémů na jaderných elektrárnách. Logickou možností je rovněž návrh a provádění experimentu nebo výzkumu na objednávku.

V případě demonstrátoru ALLEGRO se jedná o rychlý reaktor. V současné době většina provozovaných energetických reaktorů využívá ke štěpení tepelného spektra neutronů. Z toho důvodu se toto zařízení jeví, jako nevhodná volba pro trénink personálu jiných zařízení. Tyto tréninky ať pro univerzity nebo elektrárny rovněž vyžadují již jisté zvládnuté této technologie a spolehlivý provoz, který nelze u demonstrační jednotky v prvních letech očekávat. Rovněž je nutné od zařízení očekávat jistou odolnost vůči častému odstavení zařízení. Jedná se o mechanické namáhání komponent reaktoru, které může následně vyžadovat zásah údržby. Z tohoto pohledu je výhodné k těmto účelům využívat reaktory nulového výkonu bazénového typu. V tomto směru je konstrukce demonstrátoru ALLEGRO opět nevhodná. Z výčtu možností bohužel demonstrátor ALLEGRO svými parametry nesplňuje žádnou z nabízených možností samofinancování.



Obr. 20: Autor diplomové práce na stáži v dukovanském výcvikovém centru (2010).

5 Provozní náklady

Vývojová skupina projektu ALLEGRO v ÚJV Řež až doposud řešila především technickou stránku projektu. Nyní však vznikla poptávka po alespoň přibližném odhadu provozních nákladů navrhovaných technických řešení. Tento model má tedy primárně sloužit, jako pomoc pro vývojáře k snadnějšímu přehledu ekonomické stránky jimi navrhovaných technologií.

Ceny uváděné v modelu jsou současné či momentálně odhadované. Taktéž náklady na zaměstnance nebo například počty zaměstnanců v důležitých částech zařízení jsou řešeny podle aktuální legislativy a norem.

Provozní náklady jsou nutné k udržení zařízení v chodu. Patří sem pravidelný nákup surovin, médií, náklady na obsluhu a údržbu. Od kapitálových výdajů se liší především tím, že musí být placeny opakovaně. Provozní náklady se skládají ze tří hlavních částí [27][33]:

1. Přímé provozní náklady jsou obvykle přímo úměrné množství vyrobené produkce, nebo době provozu zařízení. Jsou to suroviny, pomocná média a energie, obsluha, údržba, dozor, spotřební materiál, laboratoře, zneškodňování odpadů, licenční poplatky a rezerva.
2. Nepřímé provozní náklady, jejichž výše nezávisí na množství produkce. Patří sem odpisy, daň z nemovitosti, pojištění, úroky a podíl režie společnosti připadající na jednotku produktu.
3. Distribuční náklady jsou přímo úměrné produkci a závisí na geografickém rozmístění odběratelů produktu.

Odhad investičních výdajů na projekt ALLEGRO z roku 2010 je 1200 milionů eur.[27] Odpisy z této částky jsou výrazně vyšší než všechny ostatní části provozních nákladů. Rovněž pro vývojový tým projektu ALLEGRO jsou odpisy nedůležité. Budu tedy nadále počítat provozní náklady (provozní výdaje) bez odpisů.

5.1 Lidské zdroje

Nejproblematictější úkolem bylo určení, jaké zaměstnance bude provoz demonstrátoru ALLEGRO potřebovat. Pro získání relevantních údajů jsem využil několik

postupů. Předpokládal jsem, že vedení zařízení bude přibližně odpovídat klasickému vedení v jiné podobné organizaci. Pracovní pozice a počty lidí jsou tedy odvozeny od jiných vědecko-technických organizací podobné velikosti, a abych nezanedbal, že jde o demonstrační model reaktoru. Jako výchozí prvek jsem použil jadernou elektrárnu Dukovany a výzkumný reaktor LRV-15.

Následoval odhad pracovních pozic a počtu zaměstnanců v technické části ALLEGRA. Použil jsem nákresy zařízení a odtud odvodil maximální počty zaměstnanců, abych získal horní hranici jejich počtu. Přesněji byla identifikována hlavní zařízení demonstrátoru, porovnána se stroji a zařízeními jaderné elektrárny Dukovany a za pomoci pracovníka personálního oddělení jaderné elektrárny Dukovany jim byly přiřazeni potřební pracovníci. K dalšímu zpřesnění počtu pracovních pozic jsem využil údaje z provozu výzkumného reaktoru LVR-15 CVŘ Řež. Zde mi byl rovněž nápomocen personál zařízení. [34]

Následně bylo třeba rozlišit, které pracovní pozice je třeba mít obsazené 24 hodin denně a je zde tedy nutný třísměnný provoz. Na zbývajících pozicích je plně dostačující standartní jednosměnný provoz.

Tabulka 2: Útvary obsazené 24 hodin denně

směna 1 - 6 + záskok
Skupina reaktorový blok
Skupina primární okruh
Skupina pomocné provozy
Skupina měření a řízení
Skupina elektro

Tabulka 3: Seznam útvarů

Název útvaru	
právní podpora lokalit	odbor řízení provozu
organizace a hodnocení změn	oddělení technologie provozu
správa dokumentace	nákup služby pro LC jaderné elektrárny
koncepce systému kvality a řízení procesů	Skupina Systém kontroly řízení
inspektorát bezpečnosti	Skupina přetržitá obsluha
daně	odbor péče o zařízení
V4G4	oddělení analýzy a podpora péče o zařízení
Controlling a Reporting V4G4	Skupina analýzy nákladů
ekonomická podpora V4G4	Skupina zabezpečení dodavatelské údržby
bezpečnost	Skupina analytická podpora informační systém
licencování	oddělení jaderná část
jaderná bezpečnost a havarijní připravenost	skupina budova pomocných provozů
řízení jaderné bezpečnosti	oddělení stavební část
jaderná bezpečnost	skupina jaderné objekty
havarijní připravenost	skupina dopravní a technické služby
hodnocení rizika	skupina transportně technologická zařízení a místní dispečink
řízení Radiační ochrana	oddělení transportně technologická část
Skupina řízení Radiační ochrana	skupina mistr provozu
Radiační ochrana provozu	oddělení péče o zařízení Systém kontroly řízení
Skupina provozní Radiační ochrana provozu	Skupina správa EAGLE a UIS
radiační kontrola okolí	Skupina správa provozní celek a diagnostiky
Skupina radiační kontrola okolí	Skupina správa ostatní systémy
Osobní dozimetrická kontrola	Skupina správa diagnostiky a specializované systémy
metrologie	oddělení péče o zařízení elektro
fyzická ochrana a požární ochrana	Skupina správa VN
Fyzická ochrana	Skupina správa automatik a ochran
Skupina provoz Technické systémy fyzické ochrany	Skupina správa náhradní napájení a záložní zdroje napájení 1. kategorie
Požární ochrana	oddělení specialistů profesní podpory
Hasiči	Skupina Sdružené projektové pracoviště reaktorová nádoba
technická bezpečnost	Skupina Sdružené projektové pracoviště točivé energetické stroje
tvorba a dohled nad progamem kontrol	Skupina Sdružené projektové pracoviště armatur
dohled nad technickou bezpečností	Skupina Sdružené projektové pracoviště diesel generátor a potrubí
ekologie	odbor reaktorová fyzika
BOZP (Bezpečnost a ochrana zdraví při práci)	oddělení projektování a BH vsázek
odpady a dekontaminace	oddělení správa a kontrola jaderné palivo a aktivní zóna
řízení nákladů	odbor koordinace
řízení aktiv JE	Skupina technologického zabezpečení a příprava DP
centrální inženýring	Skupina směnoví dispečerů údržby
inženýring JE	oddělení koordinace prací
technologie strojní a stavební	Skupina koordinace prací-primární okruh
měření a řízení a elektro	Skupina koordinace prací-elektro
příprava a realizace projektů	Skupina koordinace prací-Systém kontroly řízení
PARP JE-technologie a stavba	odbor provozní režimy
PARP JE-elektro a Systém kontroly řízení	oddělení provozní režimy a předpisy
řízení životnosti a LTO (long term operation)	skupina správa provozní dokumentace
řízení dokumentace	oddělení chemické režimy
systém řízení péče o majetek	skupina chemické režimy
Informační systém elektrárny	skupina laboratoře
technická kontrola a diagnostika JE	oddělení ekonomie provozu
TK strojní a nedestruktivní testování JE	period. příprava a přípr. dodav. JE
TK elektro, měření a řízení a stavební JE	řízení kvalifikací
diagnostika JE	zaměstnanecké vztahy
metrologie JE	strategický nábor
speciální kontrola JE	služby LZ zákazníkům-elektárny
plánování a podpora řízení CI	správa databází nákupu
síťové grafy	sklady JE
plánování a koordinace činností	NSenior pro LC elektro, Systém kontroly řízení a NM elektro, Systém kontroly řízení
kvalifikace dodavatelů	nákup materiál strojní
strategie dodavatelského systému	Oddělení komunikace
Experimentální elektrárna ALLEGRO	

Pracovníky zajišťující jadernou bezpečnost, chemii provozu, bezpečnost provozu a podobné další jsem určoval podle příslušných prováděcích nařízení (Státní úřad jaderné bezpečnosti a IAEA). Díky tomu jsem získal potřebnou představu o minimálním množství zaměstnanců na kontrolní stanoviště, do laboratoří, zajišťující odběry apod. Mezi tuto skupinu patří i hasičský záchranný sbor. Informace o provozních nákladech místní hasičské stanice jsem získal částečně ze statistické ročenky HZS [35] a částečně mi byly přímo sděleny na krajském ředitelství hasičského záchranného sboru.

Tabulka 4: Náklady na provoz hasičské záchranné stanice (vše kromě odpisů jsou i výdaje)

Náklady na provoz HZSp	Částka	Procent z celkových nákladů
Spotřeba ostatní materiál	571 000 Kč	0,12%
Spotřeba osobní ochranné pomůcky	1 028 000 Kč	0,22%
Spotřeba pohonných hmot	202 000 Kč	0,04%
Spotřeba dr. hmotného majetku	273 000 Kč	0,06%
Cestovné	131 000 Kč	0,03%
Nájem, správa objektů, praní prádla pro HZS	2 000 Kč	0,00%
Dopravní služby	12 000 000 Kč	2,54%
Telco služby	51 000 Kč	0,01%
Mzdové náklady	34 810 000 Kč	7,36%
Sociální zabezpečení a zdravotní pojištění	11 829 000 Kč	2,50%
Zákonné sociální náklady	1 067 000 Kč	0,23%
Ostatní sociální náklady	1 601 000 Kč	0,34%
Odpisy dlouhodobého hmotného majetku	81 000 Kč	0,02%
Údržba	800 000 Kč	0,17%
Celkové roční náklady	64 446 000 Kč	13,63%

Kompletní seznam pracovních pozic se nachází v příloženém excelovém souboru na listu „Pracovní pozice“. V prvním sloupci „Název útvarů“ jsou vypsány všechny uvažované útvary. Následně jsou ve druhém sloupci k tomuto útvaru přiřazeny nejvyšší pracovní pozice v rámci tohoto útvaru. Názvy pracovních pozic byly pro zjednodušení rozděleny do šesti skupin:

- Vedení
- Manažer
- Vedoucí
- Senior

- Specialista
- Zaměstnanec

Tyto skupiny se do sebe odlišují rozdílnými náklady na zaměstnance. Konkrétně byla odhadnuta základní hrubá mzda na 20 000Kč a ta byla přidělena skupině „Zaměstnanec“, ostatní skupiny se pak odlišují násobkem této mzdy (mohou se rovněž lišit výší benefitů, nákladů na školení aj.). V následujícím sloupci „Počet zaměstnanců útvaru“ je ke konkrétnímu útvaru přiřazen počet zaměstnanců. Pro výpočet provozních nákladů na mzdy je uvažován na útvaru vždy jeden zaměstnanec ve vedoucí pozici, pokud je útvaru přiděleno více zaměstnanců než jeden, pro tyto další zaměstnance je pak počítáno s náklady ze základní platové skupiny „zaměstnanec“. Následující tři sloupce upravují násobek základní mzdy pro jednotlivé útvary. Buď je možné ve sloupci „platová kategorie (pevně)“ zadat název nejvyšší pozice v útvaru z šesti možných skupin. K této pozici je pak automaticky přidělen násobek základní mzdy ve sloupci „násobek průměrné mzdy (automaticky)“. V případě, že by ani jedna skupina neodpovídala pozdějším potřebám a bylo nutné pro konkrétní útvar přiřadit odlišný násobek základní mzdy, byl přidán následující sloupec „násobek průměrného platu (ručně)“. V tomto sloupci je možné zadat velikost násobku základní mzdy přímo pro konkrétní útvar. V posledním sloupci této tabulky „Náklady na útvar za měsíc“ se zobrazují celkové náklady na zaměstnance tohoto útvaru včetně všech uvažovaných nákladů na zaměstnance (sociální a zdravotní pojištění, benefity aj.).

Lidské zdroje patří do skupiny přímých provozních nákladů. Základní stavebním kamenem těchto nákladů je zaměstnanec a jeho hrubá mzda. K těmto nákladům je třeba připočítat sociální a zdravotní pojištění, tím vzniká tzv. super hrubá mzda (1).

$$\text{Hrubá mzda} + \text{sociální pojištění} + \text{zdravotní pojištění} = \text{superhrubá mzda (1)}$$

Dále pak je třeba připočítat zaměstnanecké benefity, ty obvykle nabývají hodnot dalších 20-25%. [27] Celkový výpočet mzdových nákladů na zaměstnance se nachází v excelovém souboru na listu „Mzdové náklady“

Tabulka 5: Základní parametry pro výpočet mzdových nákladů

Základ mzdy	20 000 Kč
Minimální mzda	9 900 Kč
Sociální pojištění	25,00%
Zdravotní pojištění	9,00%

Tato tabulka (Tabulka 5) obsahuje základní vstupní parametry pro výpočet mzdových nákladů zaměstnanců. V prvním řádku je možné zadat „základní mzdu“ tedy částku, jejímž násobkem budou zaměstnanci odměňováni. Druhý řádek slouží, jako zabezpečení, aby v žádné z následujících platových skupin neklesl násobek základní mzdy pod hranici minimální mzdy. Třetí a čtvrtý řádek slouží pro stanovení sociálního a zdravotního pojištění.

Vzhledem k tomu, že mzdové náklady jsou obvykle výhradně důvěrnou informací, musel jsem tuto nákladovou položku řešit odhadem, založeném na průměrných platech v daných odvětvích. [29] Vytvořil jsem několik platových tříd, kdy jsou skupiny zaměstnanců odměňovány n-násobkem průměrné mzdy. Tyto skupiny, a čím se od sebe odlišují, jsou vypsány v Tabulce 6 na straně 51.

Jednotlivé platové skupiny jsou od sebe odlišeny násobkem základní mzdy. Tento násobek se nachází ve druhém sloupci tabulky „Násobek základní mzdy“. Následující sloupec „Hrubá mzda“ pro kontrolu ukazuje hrubou mzdu konkrétní skupiny. V dalším sloupci „Superhrubá mzda“ jsou pak započítány náklady na zdravotní a sociální pojištění. K platu zaměstnance je zároveň třeba připočítat náklady na benefity. Tato kategorie je velice široká a náklady na ní se obvykle pohybují okolo 20-25% platu. Sloupce „Benefity celkem v procentech/korunách“ je možné zadat hodnotu buď v procentech z platu, nebo přímo konkrétní částku. V dalším sloupci „Přepočet c. benefitů koruny/procenta“ se pak ukazuje přepočet na obě varianty. Dále je třeba do nákladů na zaměstnance započítat náklady na školení. Ty je možné zadat ve sloupci „Školení“. Předposlední sloupec „Mimořádné náklady“ slouží pro nepravidelné, či předem nepredikovatelné situace. Předposlední dva sloupce jsou předpřipraveny, budou-li nutné. Je nutné poznamenat, že u takto rozsáhlého zařízení již počítám s vlastním útvarem na školení zaměstnanců. V posledním sloupci „Veškeré náklady na

zaměstnanec“ je pak celková měsíční suma uvažovaných nákladů na jednotlivé platové skupiny.

Jaderný reaktor prochází periodicky dvěma stavy – provoz a odstávka. Zatímco za provozu je počítáno pouze s kmenovými zaměstnanci, během odstávky je nutné zajistit další kvalifikovanou pracovní sílu. Pro výpočet těchto nákladů slouží následující Tabulka 7 a Tabulka 8 na straně 51.

Tabulka 7: Základní parametry odstávky

Počet dní odstávky	40		
Nasmilovaná základní mzda za měsíc práce	20 000 Kč	Počet pracovních dní v měsíci	21

V prvním řádku je zadáván počet dní odstávky za rok. Tento údaj slouží nejen pro výpočet mzdy zaměstnanců přibráných na odstávku, ale v dalších částech souboru, také pro změnu výpočtu nákladů na vlastní spotřebu (během odstávky výrazně klesá vlastní spotřeba). Následně je zadávána velikost „základní mzdy“ jejíž násobky budou zaměstnanci ohodnoceni. A také počet pracovních dní v měsíci. Je tedy možné uvažovat práci na odstávce pouze o víkendech, anebo naopak v případě potřeby započítat i práce o víkendech. I přesto, že délka odstávky má výrazný vliv na provoz reaktoru, v případě demonstrátoru ALLEGRO se výdaje na provoz zařízení v závislosti na počtu dní odstávky téměř nemění.

Pro odstávku jsou opět vytvořeny platové skupiny. Ke každé skupině deseti "základních" zaměstnanců je připočítáván jeden "mistr" a pro skupinu 20 "základních" zaměstnanců je připočten jeden vedoucí. Vzhledem k tomu, že se jedná o zaměstnance najímané na omezenou dobu. Není nutné řešit další zaměstnanecké náklady, jako u kmenových stálých zaměstnanců.

Tabulka 9 shrnuje výsledné hodnoty z tohoto listu. Tedy měsíční a roční náklady/výdaje na zaměstnance kmenové i nabírané při odstávce. Zároveň, pro usnadnění orientace týmu ve významnosti podskupiny provozních nákladů, je v posledním sloupci zobrazeno procentuální zastoupení na celkových ročních nákladech.

Tabulka 9: Výsledné výdaje (zároveň náklady) na zaměstnance

Mzdové výdaje	MĚSÍC	ROK	Procent z celkových výdajů
Zaměstnanci	22 461 616 Kč	269 539 392 Kč	57,01%
Odstávka	69 841 Kč	838 095 Kč	0,18%
Součet	22 531 457 Kč	270 377 487 Kč	57,18%

5.2 Média

Helium

Odvod tepla z reaktoru projektu ALLEGRO je realizován za pomoci hélia, stejně tak slouží jako přenosové médium v systému havarijního chlazení – DHR (decay heat removal system). I přes veškeré snahy není v současné době technicky proveditelné, aby byl primární okruh zcela bez úniků (není technicky možné dokonalé utěsnění). Cena helia po roce 2015 (po plánované privatizaci zásob USA) bude pravděpodobně vyšší než dnes. Horní odhad předpokládané roční spotřeby hélia pro primární okruh a DHR činí tři inventáře primárního okruhu tj. 450 m³. Při spotřebě 450 m³ ročně a dnešních cenách za helium příslušné čistoty (7 MPa, 260 °C, 8000 Kč za 50 l při 20 MPa a 20 °C) lze očekávat náklady řádově kolem 7,5 mil Kč ročně. [37]

Helium jako plyn musí být zároveň čištěn od prachových částic, procházet molekulárními sítěmi, být vymrazován a projít oxidací, než se vrátí zpět do oběhu primárního okruhu. Tyto procedury jsou energeticky velmi náročné a zároveň je třeba započítat i opotřebení filtrů. Odhaduji, že částka na samotnou údržbu hélia bude necelých 1,5 mil Kč za rok (viz Tabulka 10). [38]

Guard vessel

Celý systém primárního okruhu bude uzavřen v guard vessel (ochranné obálce) naplněné dusíkem. Celkový volný objem guard vessel činí 1650 m³ při atmosférickém tlaku. [39] Předpokládaná zásoba dusíku činí dvojnásobek objemu, tedy 3300 m³. Předpokládané náklady na údržbu hélia a dusíku jsou obsaženy v Tabulce 10 na straně 51.

Vodní hospodářství

Oproti klasické jaderné elektrárně je primární okruh ALLEGRA heliový. Pro guard vessel je plánováno využívat dusík jako médium pro odvod tepla. Zbývá tedy pouze

Tabulka 6: Odlišení jednotlivých pracovních tříd

Označení platové třídy	Násobek základní mzdy	Hrubá mzda	Superhrubá mzda	Benefity celkem v procentech/korunách	Přepočet c. benefitů koruny / procenta	Školení	Mimořádné náklady	Veškeré náklady na zaměstnance
manažer	4	80 000 Kč	107 200 Kč	23,00%	24 656 Kč / 23,00 %	0 Kč	0 Kč	131 856 Kč
senior	2	40 000 Kč	53 600 Kč	21,00%	11 256 Kč / 21,00 %	0 Kč	0 Kč	64 856 Kč
specialista	2	40 000 Kč	53 600 Kč	21,00%	11 256 Kč / 21,00 %	0 Kč	0 Kč	64 856 Kč
vedení	6	120 000 Kč	160 800 Kč	24,00%	38 592 Kč / 24,00 %	0 Kč	0 Kč	199 392 Kč
vedoucí	3	60 000 Kč	80 400 Kč	22,00%	17 688 Kč / 22,00 %	0 Kč	0 Kč	98 088 Kč
zaměstnanec	1	20 000 Kč	26 800 Kč	21,00%	5 628 Kč / 21,00 %	0 Kč	0 Kč	32 428 Kč

Tabulka 8: Odlišení skupin zaměstnanců odstávky

Položka	Počet zaměstnanců	Násobek průměrné nasmlouvané mzdy	Průměrná mzda za počet pracovních dní	Celková nasmlouvaná mzda za počet pracovních dní	Celková nasmlouvaná mzda za počet dní
Zaměstnanci	25	0,6	12 000 Kč	300 000 Kč	571 429 Kč
1 mistr na 10 lidí	3	1	20 000 Kč	60 000 Kč	114 286 Kč
1 vedoucí na 20 lidí	2	2	40 000 Kč	80 000 Kč	152 381 Kč
Součet	30		72 000 Kč	440 000 Kč	838 095 Kč

Tabulka 10: Výdaje (zároveň náklady) na údržbu médií

Médium	Umístění	Výměna filtrů za rok	Regenerace za rok	Ostatní náklady za rok	Spotřeba kWh	Spotřeba	Celkem za rok	Procent z lekových výdajů
Helium	Primární okruh, DHR	200 000 Kč	200 000 Kč	100 kW (200 dní) + 100 kW (100 dní)	720000	1 008 000 Kč	1 408 000 Kč	0,30%
Dusík	Guard vessel	200 000 Kč	50 000 Kč	100 kW (100 dní)	240000	336 000 Kč	586 000 Kč	0,12%
Celkem							1 994 000 Kč	0,42%

sekundární okruh, kde médiem pro odvod tepla bude voda. Je tedy třeba provozovat celý systém ionexových filtrů na získání a kontinuální čištění demineralizované vody.

Vzhledem k tomu, že sekundární okruh ALLEGRA je plánován pouze na přenos tepelného výkonu reaktoru (není zde plánována žádná turbína ani směšovací výměník v chladicí věži) budou ztráty demineralizované vody podstatně menší než u klasické elektrárny s vodním sekundárním okruhem. Ztráty jsou předpokládány ve výši 10 m³ za rok, převážně z důvodu nutnosti vyprázdnit sekundární okruh při plánované kontrole a odstávce zařízení. Při maximální předpokládané ceně demineralizované vody (30 Kč/litr včetně nákladů na čištění a provoz ionexových filtrů)[37] se náklady pohybují v řádu statisíců. Odhadované ceny vody jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 11: Odhadované ceny vody

Voda	
Užitková	40Kč/m ³
Pitná	40Kč/m ³
Dešťová	20Kč/m ³
DEMI	30Kč/l

Oproti tomu náklady na užitkovou a pitnou vodu budou zhruba stejné jako v každém podobném zařízení. Nejvhodnější je spotřebu vody přepočítat přímo na jednotlivé zaměstnance. Zde je třeba v první řadě určit spotřebu vody na zaměstnance. V tomto směru mi pomohla ČSN norma 73 5305.[40] Pro zjednodušení jsem uvažoval dvě skupiny. První skupina jsou „fyzicky“ pracující, ti využívají pitnou vodu mimo jiné na pití (20 l), sprchu (70l) a podobné. Druhou skupinou jsou „duševně“ pracující, jejichž spotřeba pitné vody je výrazně nižší (20l). Můžu předpokládat zvláštní rozvod užitkové vody na WC a spotřebu 60 litrů na zaměstnance. Voda bude v takovém množství brána pravděpodobně z vlastního zdroje s vlastní vodárnou a čistírnou. Na jeden rok tedy můžu předpokládat náklady nepřekračující jeden milion korun. [27]

Užívaná média jsou uvedena v Tabulce 12 (strana 56) z excelovského souboru, list média. První a druhý sloupec udávají médium a místo jeho využití. V následujících dvou sloupcích je uvedena předpokládaná spotřeba média za rok a odhadované náklady s příslušnými parametry média. V předposledním sloupci jsou pak uváděny výsledné

náklady na médium za rok. Poslední sloupec opět slouží pro vývojáře ALLEGRA, pro snadnější orientaci ve významnosti podskupiny provozních nákladů.

5.3 Vlastní spotřeba

Vlastní spotřeba u klasické (PWR) jaderné elektrárny dosahuje přibližně šesti až sedmi procent z vlastní výroby. Nejnáročnějšími zařízeními bývají čerpadla dopravující chladicí vodu. Projekt ALLEGRO oproti tomu využívá dmychadla, která obecně dosahují nižší účinnosti než čerpadla. Zároveň je nutné udržovat nucenou cirkulaci v guard vessel i během odstávky. Další spotřebiče elektrické energie jsou přibližně srovnatelné. Jedná se především o počítačový systém kontroly řízení a měřicí platformy. Rovněž kancelářská elektronika, osvětlení a podobná zařízení, v takovém množství, jsou výrazným spotřebičem elektrické energie. Ještě je nutné podotknout, že se spotřeba jednotlivých zařízení mění podle provozu demonstrátoru, tedy zda je zařízení v provozu nebo v režimu odstávky.

Uvažovaná spotřeba jednotlivých spotřebičů demonstrátoru pochází od vývojového týmu ALLEGRA. V následující tabulce uvádím nejvýraznější spotřebiče elektrické energie [39]:

Tabulka 13: Zařízení vlastní spotřeby

Zařízení	Spotřeba
héliová dmychadla – primární okruh	852 kW
DHR	60 kW
guard vessel (tlaková obálka)	60 kW
čerpadlo sekundární okruh	32 kW
Chladicí věž	168 kW
SKŘ (systém kontroly a řízení), měření	100 kW
Systém čištění médií	300 kW
Předpokládaná spotřeba na jednoho zaměstnance	4,8 kW

Výpočet této podskupiny provozních nákladů se nachází v excelovském souboru na listu „vlastní spotřeba“. První tabulka na listu (Tabulka 14, strana 56) slouží pro výpočet spotřeby strojů a zařízení demonstrátoru.

V prvním sloupci jsou zařízení vyjmenována a v následujícím je jim přiřazena plánovaná/předpokládaná spotřeba. Následující sloupec udává předpokládané dny v provozu za rok. Lze rozlišit zařízení, která jsou v provozu neustále a zařízení, která jsou zapínána v závislosti na odstávce zařízení. Tyto hodnoty jsou provázány s listem „Mzdové náklady“ a nastavují se podle počtu dní odstávky. Vzhledem k tomu, že základní části demonstrátoru jsou zatím ve vývoji, lze předpokládat, že se počty například dmychadel v zařízení guard vesselu mohou měnit, jde zde tedy zařazen následující sloupec, kde je změnu možné provést a ta se poté projeví v následujícím sloupci celkové spotřeby zařízení. Poslední dva sloupce se opět věnují předpokládaným provozním nákladům. Ty se odvíjejí od zadané předpokládané ceny za kWh a výši poplatku za rezervovaný příkon. Jež je možné změnit ve vedlejší buňce (Tabulka 15). Změna ceny Kč/kWh o 0,1 se následně projeví změnou nákladů na vlastní spotřebu přibližně o 1 milionu Kč.

Tabulka 15: Odhadovaná cena elektrické energie

Kč/kWh	Poplatek za rezervovaný příkon
1,4	5 000 Kč

Další nákladovou položkou, kterou musím započítat, je vytápění budov. Tyto náklady závisí na vytápěné ploše a energetické třídě budovy (viz následující tabulka). [27]

Tabulka 16: Energetické třídy budov

Vytápění budovy							
Kategorie budov	A	B	C	D	E	F	G
kWh/m2	< 51	51 - 97	98 - 142	143 - 191	192 - 240	241 - 286	> 286

V případě elektrárny bude nejvhodnější předpokládat energetický typ budovy C (běžné pro tento typ budov). Náklady na vytápění se poté budou pohybovat v řádu desítek milionů. Tuto částku je možné snížit, pokud bude využíváno odpadní teplo z ALLEGRA.

Byla tedy odhadnuta spotřeba 120kWh/m². Zároveň byla odhadnuta vytápěná plocha na 1000m² podle ČSN normy 73 5305 a počtu zaměstnanců.[40] Vynásobením těchto hodnot předpokládanou cenou elektrické energie a přepočítáním času na celý rok, byly vypočítány předpokládané náklady na vytápění budov. Tyto údaje jsou uvedeny v Tabulce 17 (strana 56).

Poslední nákladovou položkou, která je započítávána do vlastní spotřeby, je odhadovaná spotřeba elektrické energie pro jednotlivé zaměstnance. Bylo nutné odhadnout předpokládanou spotřebu běžného vybavení pracoviště.[41] Tuto hodnotu následně vynásobit uvažovaným počtem zaměstnanců a zároveň přepočítat na celý rok. Pro získání konkrétní částky, je pak nutné tuto hodnotu ještě vynásobit předpokládanou cenou elektrické energie. Všechny tyto údaje jsou shrnuty v Tabulce 18 (strana 56).

5.4 Údržba

Jsou dvě možnosti údržby, mezi kterými se může provozovatel zařízení rozhodnout. Tedy zda využijeme služeb dodavatelů zařízení a ponechá údržbu na nich nebo zda bude spoléhat na vlastní zdroje a know-how vlastních zaměstnanců.

Long term maintenance agreement (LTMA)

Především u západních jaderných elektráren je využíváno služeb dodavatelů samotného zařízení. [27] Výhodou toho řešení je dostačující jakost provedení údržby, přenesení odpovědnosti za technické komplikace, menší počet vlastních zaměstnanců. Nevýhodou je vyšší cena v případě nečekané události a případně delší doba odstranění závady. Rovněž v případě unikátnosti zakázky nemusí výrobce poskytnout záruku vůbec.

V případě demonstrátoru ALLEGRO se jedná o zařízení ojedinělé konstrukce. Po konzultacích v První Brněnské Strojárně jsem dospěl k závěru, že i přesto, že je teoreticky zvládnutelné vyrobit speciální komponenty pro zařízení ALLEGRO, je tato možnost údržby zařízení v současné době nepravděpodobná z důvodu nezájmu dodavatelů na sebe převzít vysoká rizika. Odhadovanou částku za tyto služby nedokázali ani odhadnout.

Tabulka 12: Výdaje (zároveň náklady) na média za rok

Médium	Umístění	Spotřeba za rok	Cena, objem, tlak, teplota	Cena za rok	Procent z lekových výdajů
Helium	Primární okruh, DHR	3000 kg	8000 Kč za 50 l při 20 MPa a 20 °C	7 500 000 Kč	1,58%
Dusík	Guard vessel	3300 m ³ 1 atm	550 Kč za 50 litrů při 20 MPa a 20 °C	184 250 Kč	0,04%
DEMI voda	Sekundární okruh	10 m ³	30 Kč/litr	300 000 Kč	0,06%
Pitná a užitková voda		11565,6 m ³	40 Kč/m ³	462 624 Kč	0,10%
Součet				8 446 874 Kč	1,78%

Tabulka 14: Výpočet výdajů (zároveň nákladů) vlastní spotřeby

Zařízení	Spotřeba [kW]	Dny v provozu	Počet	Celkem [kW]	Náklady za rok	Procent z celkových výdajů
Primární okruh - heliové dmychadlo	426	325	2	852	9 303 840 Kč	1,96%
DHR	20	40	3	60	80 640 Kč	0,02%
guard vessel	10	365	6	60	663 869 Kč	0,14%
čerpadlo sekundární okruh	16	325	2	32	349 440 Kč	0,07%
chladičí věž	84	325	2	168	1 834 560 Kč	0,39%
Ventilace atmosféry kontejnmentu	50	100	1	50	168 000 Kč	0,04%
Řízení elektrárny	100	365	1	100	1 226 400 Kč	0,26%
Celkem				1322	10 960 320 Kč	2,31%

Tabulka 17: Výdaje (zároveň náklady) na vytápění

Spotřeba energie [kWh]	plocha [m ²]	Celkem za	Cena	Procent z celkových výdajů
120	10000	1200000	1 680 000 Kč	0,39%

Tabulka 18: Výdaje (zároveň náklady) na zaměstnance

pc	světlo	zásuvky	rezerva	mezisoučet	režije	Celkem	Celkem na	Částka za rok	Procent z
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	zaměstnance	[W]	celkových výdajů
150	300	1000	30%	1603	200%	4809	925248	1 295 347 Kč	0,27%

Subdodavatelé

Namísto smlouvy o údržbě s dodavatelem zařízení, se někteří provozovatelé rozhodli jít cestou oprav za pomoci vlastních sil a subdodavatelů. V praxi se obvykle vyskytují kombinace obou řešení. První roky v provozu probíhají opravy nejčastěji přes dodavatele zařízení, později si elektrárna vybuduje síť subdodavatelů a zaškolí vlastní zkušený personál. Provozovatel jaderné elektrárny přijde o záruku od dodavatele, ale náklady na údržbu mohou klesnout až o řád.

Vzhledem k unikátnosti zařízení ALLEGRO (rychlý reaktor a technologie heliového okruhu) a zároveň předpokládané nutnosti častých úprav bude pravděpodobně nutné si většinu zaměstnanců zaškolit a udržovat v hlavním pracovním poměru. Odstávky budou častější a lze očekávat, že i neplánované. Bude tedy možná vhodnější využívat vlastních zaměstnanců.

Náklady na údržbu jsou utajovány, jak zákazníkem, tak dodavatelem, jejich velikost lze tedy pouze odhadnout. Z Project Costs of Generating Electricity [1] eventuálně z jiných statistik lze vyčíst, že náklady na samotnou údržbu zaujímají z provozních nákladů okolo 10%. Tyto náklady lze pouze odhadnout. Užitečným vodítkem může být informace o životnosti jednotlivých komponent.

V následující tabulce jsou uvedeny předpokládané doby (v letech) cyklů technické životnosti jednotlivých systémů [42]:

Tabulka 19: Životnost strojů a zařízení

Systém (skupina) zařízení	cyklus
Počítače a servery (řídící systém a síť LAN, monitoring,...)	5
Baterie ve vlastní spotřebě	7,5
SKŘ, systém chránění, vlastní spotřeba	15
Zařízení vlastní spotřeby, transformátory	>20
stavební konstrukce (budovy, základy), hlavní ocelové konstrukce	60 ²

² Technickou životnost lze prodloužit pravidelnou opravou protikorozní ochrany natíraných ocelových konstrukcí a opravami míst se zvýšenou korozí u konstrukcí. U budov se

Reaktorová nádoba	>30
Potrubí primárního okruhu, heliový výměník	20
Dmychadla	8

Z předchozí tabulky můžeme rámcově odhadnout výšku investic do výměny zařízení. Vzhledem k relativně krátké době provozu ALLEGRA (15 let), není nutné uvažovat vysoké investice do celkových rekonstrukcí nákladných technologických celků. Velká část zařízení svou předpokládanou životností převyšuje dobu plánovaného provozu.

Z výše uvedených důvodů bych náklady na údržbu zařízení (bez personálních nákladů) odhadnul jako u výzkumného reaktoru srovnatelného výkonu. Náklady na údržbu takového zařízení bývají obvykle relativně nízké. V přepočtu řádově miliony až desítky milionů korun za rok [34] investovaných do specializovaných strojů nebo komponent. Investice do běžných strojů a zařízení se pak náklady pohybují v řádu milionů korun.

5.5 Ostatní

Daň z nemovitosti

Výpočet této položky ročních nákladů závisí na ploše pozemku. Odhadl jsem plochu pozemku pro ALLEGRO na 100 ha. Jedná se o energetickou stavbu, tedy sazba daně je 10 Kč/m². Rovněž jsem předpokládal, že ALLEGRO se bude stavět v oblasti s nízkým zalidněním (pravděpodobně v lokalitě jiného jaderného zdroje), koeficient pozemku je tedy 1. [43] Výsledná částka pak dosahuje 10 milionu korun. Je nutné poznamenat, že v roce 2016 došlo ke změně zákona o dani z nemovitosti. Koeficienty může každá obec vyhláškou na svém území zvýšit (eventuálně snížit). V případě stavby zařízení v nové lokalitě bude tedy nutné i toto brát v úvahu a předem zjistit, jak se k dané stavbě obec postaví. Pokud bude pro stavbu zvolena lokalita již užívaná pro jiné jaderné zařízení, lze očekávat, že tyto koeficienty budou vyšší, než je základ.

předpokládá provádění údržbových oprav minimálně jednou za 10 let a modernizace minimálně jednou za 30 let (při provedení výměny technologie).

Pojištění odpovědnosti a rizika škod

Vzhledem k vysokým limitům plnění a rovněž značné jedinečnosti je i pro kapitálově silnou pojišťovnu pojištění odpovědnosti a rizika škod jaderného zařízení příliš náročné. Pojišťovny se na tyto případy sdružují v tzv. poolu. Pool poskytuje jaderným zařízením v první řadě pojištění zákonné odpovědnosti za jaderné škody vzniklé třetím stranám z provozu jaderného zařízení nebo z přepravy jaderného materiálu.

Povinné pojištění Temelína a Dukovan na vyloženě jadernou škodu stojí přes 150 milionů korun ve čtyřletém cyklu, přičemž limit plnění je zhruba do dvou miliard. [44] Náklady na jeden reaktor jsou tedy necelých 7 milionů korun.

Vzhledem k porovnatelně nižšímu výkonu, velikosti a podobným parametrům bych odhadoval, že náklady na pojištění odpovědnosti a rizika škod u ALLEGRA nepřekročí dva miliony korun.

Náklady na likvidaci

Obecně lze říct, že náklady na likvidaci jaderného zařízení dosahují až 15% počátečních investičních výdajů. Tyto náklady musím opět odhadnout při porovnání s jadernými elektrárnami. Jaderná elektrárna Temelín odvádí na jaderný účet každý rok 121 milionů korun za jeden reaktor, dukovanská elektrárna s přibližně polovičním výkonem reaktoru odvádí 93 milionů korun za jeden reaktor. Vzhledem k tomu, že ALLEGRO má plánováno pouze tři palivové vsázky a délka provozu je plánována na 15 let, tak odhaduji, že tyto náklady nepřekročí 50 milionů korun za rok.

Odpisy

Investiční výdaje projektu ALLEGRO jsou odhadovány na 1200 milionů eur (první odhad z roku 2010 společností Deloitte & Touch). Vzhledem k plánované délce provozu 15 let budou výše odpisů (lineární odepisování) činit 80 milionů eur za rok. Nelze předpokládat žádnou zbytkovou hodnotu zařízení po ukončení provozu. [27] Jedinou možnou variantou je fyzická likvidace v důsledku opotřebení.

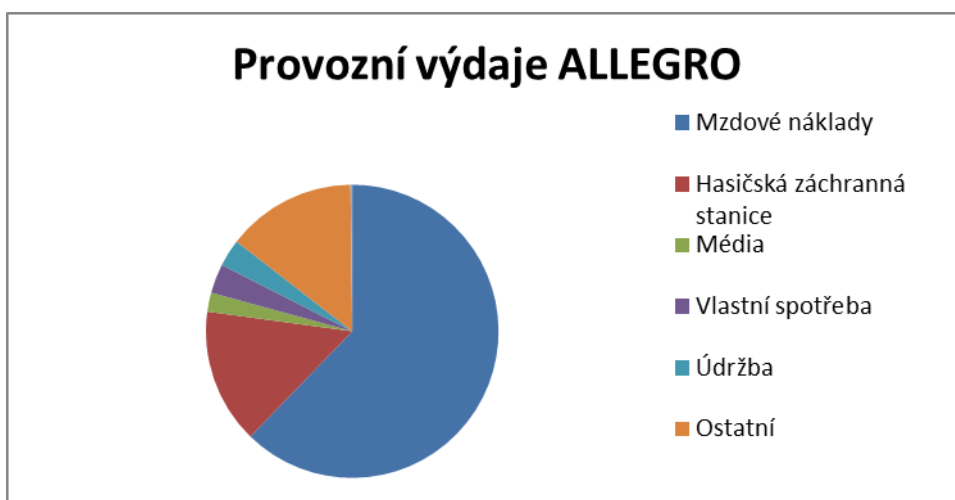
5.6 Celkové náklady

První list „Celkem“ obsahuje celkové provozní výdaje, sumarizuje výstupy z ostatních listů v Tabulce 20. Pro snadnější orientaci v získaných hodnotách, je přidán sloupec,

s procentuálním zastoupením jednotlivých položek. Zároveň pro lepší přehlednost jsou data rovněž zobrazena v koláčovém grafu (Obr. 21).

Tabulka 20: Výsledné provozní výdaje

Položka	Částka	Procent z celkových výdajů
Mzdy	269 539 392 Kč	62,26%
Hasičská záchranná stanice	64 446 000 Kč	14,89%
Média	9 094 866 Kč	2,10%
Vlastní spotřeba	13 990 045 Kč	3,23%
Údržba	13 000 000 Kč	3,00%
Ostatní	62 000 000 Kč	14,32%
Odstávka (externí zaměstnanci)	838 095 Kč	0,19%
Celkem	432 908 398 Kč	100,00%

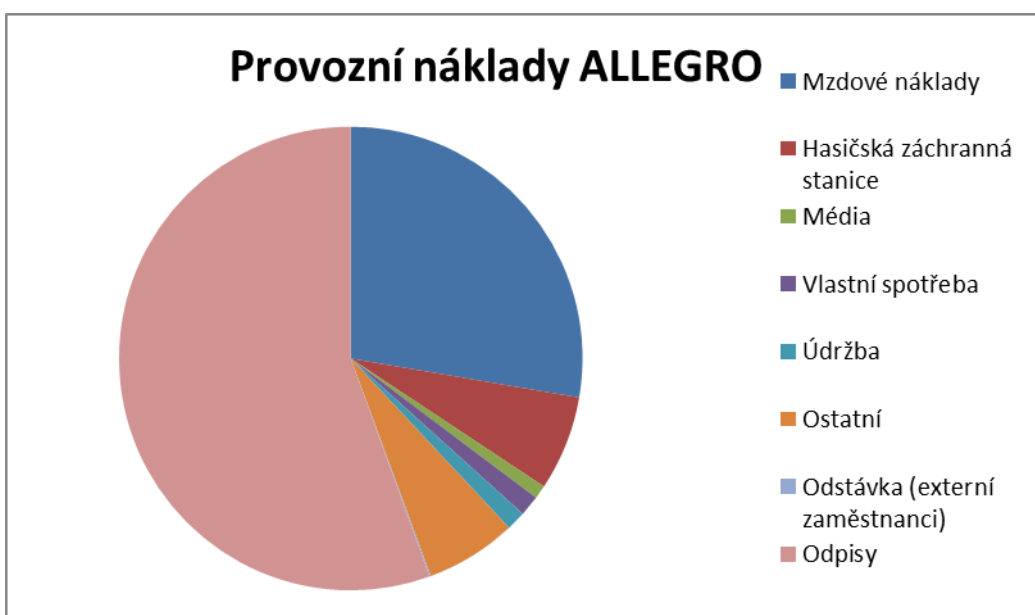


Obr. 21: Koláčový graf zobrazující provozní výdaje projektu ALLEGRO

Rovněž pro úplnost provozních nákladů jsem do excelovského souboru zařadil list „Odpisy“. Zde je možné nalézt Tabulku 21, která již obsahuje kompletní provozní náklady včetně odpisů. Zároveň jsou informace zobrazeny i v koláčovém grafu (Obr. 22).

Tabulka 21: Výsledné provozní náklady

Položka	Částka	Procent z celkových nákladů
Mzdové náklady	269 539 392 Kč	27,69%
Hasičská záchranná stanice	64 446 000 Kč	6,62%
Média	9 094 866 Kč	0,93%
Vlastní spotřeba	13 990 045 Kč	1,44%
Údržba	13 000 000 Kč	1,34%
Ostatní	62 000 000 Kč	6,37%
Odstávka (externí zaměstnanci)	838 095 Kč	0,09%
Odpisy	540 400 000 Kč	55,52%
Celkem	973 308 398 Kč	100,00%



Obr. 22: Koláčový graf zobrazující provozní náklady projektu ALLEGRO

6 Závěr

Vzhledem ke konstrukci a parametrům demonstrátoru ALLEGRO je nemožné jej alespoň částečně samofinancovat klasickým způsobem. Aktivní zóna nedosahuje žádných mimořádných parametrů, které by ji určili zajímavou pro vyvedení svazků neutronů. Rovněž konstrukční návrh by jen těžko umožnil zabudování kanálů pro vývod ionizujícího záření nebo využívání horkých komor. Vzhledem k unikátnosti zařízení je i výcvik personálu na jiné jaderné elektrárny nepravděpodobný. Také materiálový výzkum postrádá vhodnou konstrukci pro například vkládání experimentálních smyček do reaktoru. Jediný možný výzkum bude probíhat až po odstavení zařízení na materiálech primárního okruhu. Demonstrátor GFR sám o sobě je totiž „téměř bezcenný“, pokud nebude následován komerčně ziskovou technologií.

Jedinou možností snížení provozních nákladů spatřuji ve změně návrhu sekundárního okruhu. Tedy instalaci plnohodnotného sekundárního okruhu včetně parní turbíny a generátoru a zároveň instalaci plynového kotle. V případě odstavení reaktoru (v prvních letech provozu to bude pravděpodobně časté) přejde výroba tepla na plynový kotel. Toto řešení by snížilo náklady na vlastní spotřebu elektrické energie (a eventuálně i vytápění) a zároveň zajistilo zálohu v případě výpadku dodávky elektrické energie ze sítě. Ovšem na druhou stranu je z technického pohledu značně ošidné využívat tepelné výměníky na primární straně s héliem a na sekundární s vodou. Rovněž investiční náklady na stavbu takového sekundárního okruhu a pravděpodobně i dalšího okruhu kvůli bezpečnosti mohou být tak vysoké, že se navrhované řešení nemusí vyplatit. Pro snížení nákladů a zároveň i zvýšení bezpečnosti považuji za nejvýhodnější možnost mít i sekundární okruh plynový a následně odpadní teplo pouze odvádět do nesměšovací chladicí věže.

Mnou napočítané provozní náklady jsou jen přibližným odhadem, které jsem se snažil určit konzervativně. Informace z této oblasti se zjišťují jen obtížně, mnohdy jde přímo o ještě neexistující technologii nebo technické řešení. Tyto závěry mohou být časem pozměněny různými vlivy (politika, ekonomika, technologie) a musí být předmětem další diskuze.

Nejvýraznější položkou jsou náklady na zaměstnance. Vzhledem k typu zařízení, jeho složitosti a jeho výzkumnému účelu bude tato nákladová položka spíše ještě růst. Toto zařízení bude potřebovat zkušené odborníky, je tedy třeba je finančně motivovat. Další položkou je hasičská záchranná služba. Náklady na provoz HZS jsou aktuální pro rok 2015, lze tedy předpokládat, že pokud její financování nepřevzme stát, budou i nadále se pohybovat okolo 14 % z celkových provozních nákladů. Náklady na média se pohybují v řádu procent, je očekávatelné, že dojde ještě k jejich snížení (efektivnější a levnější technologie čištění dusíku a hélia). Vlastní spotřeba je poměrně dobře odhadnutelná položka, elektrická zařízení jsou známá. Tuto položku samozřejmě ovlivní cena elektrické energie v budoucnu. Tato nákladová položka zaujímá přes 3 % z nákladů, a pokud bude „vlastní spotřeba“ na trhu šikovně nakoupena, může se i snížit. Položka údržba je na odhadnutí velice náročná. Jednak je zásadní otázkou zda se provozovatel rozhodne pro Long term maintenance agreement nebo zvolí cestu subdodavatelů. Za druhé velmi záleží na spolehlivosti ještě nevyzkoušených technologií, srovnání s jiným zařízením je tedy pouze orientační. Poslední položka jsou náklady spjaté s legislativou. Je otázkou, jak bude na takového výzkumné zařízení legislativa daného státu pohlížet, zda nebudou některé náklady „odpuštěny“ nebo naopak ještě vzrostou oproti českému modelu. Vzhledem k tomu, že v mém řešení přesahují legislativní náklady 14 %, jsou poměrně výrazné a předpokládám, že budou hrát na závěr velkou roli ve výběru lokality pro stavbu demonstrátoru ALLEGRO.

7 Literatura

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Projected Costs of Generating Electricity. OECD Publication, 2010. ISBN 978-92-64-08430-8.
- [2] HAMMER, Hector a BOYLE, Basile. *Green building and low energy building*. 1st ed. Delhi: Academic Studio, 2012. ISBN 978-81-323-0892-8.
- [3] KEYHANI, Ali. *Design of smart power grid renewable energy systems*. Hoboken: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-62761-7.
- [4] Skupina ČEZ, *Energy Outlook 2050*. Praha: Economia, 2015.
- [5] JAKOUBEK, Pavel. *Modelování a řízení spalování v kotli spalujícím fosilní paliva s ohledem na tvorbu emisí, Modeling and control of combustion in fossil fuel power plant boiler with respect to emissions in flue gasses*. Praha, 2011. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Strojní fakulta.
- [6] BEISER, Arthur. *Úvod do moderní fyziky*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1975.
- [7] ZEMAN, Jaroslav. *Reaktorová fyzika*. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02337-0.
- [8] MATĚJKA, Karel. *Vyhořelé jaderné palivo*. 1. vyd. Praha: ČVUT - FJFI - Katedra jaderných reaktorů, 1996, 145 s. ISBN 80-7078-352-4.
- [9] LAMARSH, John R. *Introduction to nuclear engineering*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, xv, 783 s. ISBN 0-201-82498-1.
- [10] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderné reaktory*. Praha: SNTL, 1981.
- [11] HEJZLAR, Radko. *Mechanika tekutin*. Vyd. 4. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03350-3.
- [12] UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *Obrázky*. 2015. Dostupné z: <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>
- [13] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderné reaktory II*. Praha, 2011. Skriptum. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [14] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderné reaktory I*. Praha, 2010. Skriptum. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [15] GEN4 International Forum. *Annual report 2014*. 2014. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_74053/gif-annual-report-2014

- [16] KLENER, Vladislav, ed. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: AZIN CZ, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
- [17] GEN4 International Forum. *Generation IV Systems – GFR*. 2015, [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42148/gas-cooled-fast-reactor-gfr
- [18] GEN4 International Forum. *Generation IV Systems – LFR*. 2015, [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42149/lead-cooled-fast-reactor-lfr
- [19] GEN4 International Forum. *Generation IV Systems – MSR*. 2015, [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42150/molten-salt-reactor-msr
- [20] GEN4 International Forum. *Generation IV Systems – SFR*. 2015, [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42152/sodium-cooled-fast-reactor-sfr
- [21] GEN4 International Forum. *Generation IV Systems – SCWR*. 2015, [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr
- [22] GEN4 International Forum. *Generation IV Systems – VHTR*. 2015, [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr
- [23] CEA. *Les réacteurs à neutrons rapides de 4e génération à caloporteur sodium – le démonstrateur technologique ASTRID*, Gif-sur-Yvette: Centre de Saclay, 2012.
- [24] ALEMBERTI, A. *ALFRED – Conceptual design and first steps toward realization*. Ansaldo nucleare energy group. Počítačová prezentace. 25. 04. 2014.
- [25] GRASSO, G., et al. The core design of ALFRED: A demonstrator for the European lead-cooled reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, č. 278, s. 287–301.
- [26] ALEMBERTI, A., et al. Overview of lead-cooled fast reactor activities. *Progress in Nuclear Energy*. 2014, č. 77, s. 300–307.
- [27] BĚLOVSKÝ, L. Projekt ALLEGRO - He-Cooled Fast Reactor Demonstrator. Nordic-Gen4 Seminar. Finsko, 2014.
- [28] LÍŠKA, P. a COGNET, G. *The ALLEGRO project – European project of the fast breeder reactor*. 1st International Nuclear Energy Congress. Warsaw, 2011.
- [29] STAINSBY, R. *Gas Cooled Fast Reactor*. GIF EG Meeting. Brussels: GIF, 2013.

- [30] CEA. *Les réacteurs à neutrons rapides de 4e génération à caloporteur gaz – le réacteur expérimental ALLEGRO*. Gif-sur-Yvette: Centre de Saclay, 2012.
- [31] CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ. *Výzkumný reaktor LVR-15*. Řež, 2015. Dostupné z: <http://cvrez.cz/vyzkumna-infrastruktura/vyzkumny-reaktor-lvr-15/>
- [32] BARTH, Rolf F. Boron neutron capture therapy at the crossroads: challenges and opportunities. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67.7: S3–S6.
- [33] ROUŠAR, I. *Projektové řízení technologických staveb*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2602-1.
- [34] JUŘÍČEK, V. - ústní sdělení (ředitel sekce Provoz reaktorů, Centrum výzkumu Řež, Hlavní 130, 25068 Husinec-Řež) dne 25. 6. 2015
- [35] HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR ČR. *Informační servis - Statistiky*. 2015. Dostupné z: <http://www.hzscr.cz/info-servis-statistiky.aspx>
- [36] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Statistická ročenka České republiky – 2015*. 2015. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/16-energetika>
- [37] DITL, P. *Difúzní separační pochody*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01439-8.
- [38] BĚLOVSKÝ, L. – ústní sdělení (vědecký pracovník odd. Těžké havárie a termomechanika, ÚJV Řež, a.s., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež) dne 7. 11. 2015.
- [39] KORYČANSKÝ, R. *Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR*. Brno, 2014. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [40] ČSN 73 5305 – *Administrativní budovy a prostory*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [41] TECHNICKÁ ZAŘÍZENÍ BUDOV. *Roční spotřeba vody*. 2016. Dostupné z: <http://www.http://voda.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/94-smerna-cisla-rocni-potreby-vody>
- [42] ČEPS. *Technická norma - technická životnost zařízení PS*. 2013
- [43] MINISTERSTVO FINANCÍ ČESKÉ REPUBLIKY. *Daň z nemovitosti*. 2014. Dostupné z: <http://www.mfcr.cz/cs/aktualne/aktuality/2014/prehled-koeficientu-k-dani-z-nemovitosti-16277>
- [44] SKUPINA ČEZ. *Informační portál – Skupina ČEZ*. 2015. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/otazky-odpovedi/1.html>

- [45] SÚRAO. Správa úložišť radioaktivních odpadů – Odvody na jaderný účet. 2015. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/O-SURAO/Aktuality/Vyjadreni-SURAO-ke-kontrolnimu-zaveru-NKU-kontroly-c.-09-15>
- [46] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Dynamika jaderných reaktorů*: Dočasná vysokoškolská učebnice. 1. vyd. Praha: Ministerstvo školství, 1987.
- [47] ANTAKI, G. a GILADA, R. *Nuclear power plant safety and mechanical integrity: design and operability of mechanical systems, equipment and supporting structures*. Oxford: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-12-417248-7.
- [48] HEJZLAR, Radko. *Termodynamika*. Vyd. 5. Praha: ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04540-4.
- [49] HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla*. Vyd. 4. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02974-3.
- [50] YAMADA, K., SAKURAI, S., ASANUMA, Y., HAMAZAKI, R., ISHIWATARI, Y., KITO, K., *Overview of the Japanese SCWR concept developed under the GIF collaboration*. In: Proc. ISSCWR-5. Vancouver, Canada, March 13–16, 2011.
- [51] KANEDA, J., et al. *Material development for supercritical water-cooled reactor*. In: Proc. ISSCWR-5, Vancouver, Canada, March 13–16, 2011.
- [52] INES: *mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí: uživatelská příručka*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost v nakl. Nuklin, 2005. ISBN 80-7073-097-8.
- [53] SCHULENBERG, T., STARFLINGER, J. *High performance light water reactor design and analyses*, KIT Scientific Publishing, 2012.
- [54] YETISIR, M., et al. *Conceptual Mechanical Design for A Pressure-Tube Type Supercritical Water-Cooled Reactor*. In: Proc. 5th International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors. Vancouver, Canada, March 13–17, 2011.
- [55] GUZONAS, D., et al. *Water chemistry in a supercritical water cooled pressure tube reactor*, Nuclear Technology. 2012, č. 179.
- [56] KÖRBER, Miroslav. *Vybrané termofyzikální výpočty experimentální sondy vysokoteplotního reaktoru*. Praha, 2007. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [57] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *International conference on fifty years of nuclear power – The next fifty years*. Vienna (Austria), 2004. p. 103.

- [58] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear Power Technology Development Section*. Vienna (Austria). ISBN 978-92-0-108808-6.
- [59] ZHANG, Z., et al. *Current status and technical description of Chinese 2 × 250 MWth HTR-PM demonstration plant*. Nuclear Engineering and Design, č. 239, sv. 7, s. 1212–1219, ISSN 0029-5493.
- [60] VAN RAVENSWAAY, et al. *4. International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*. Washington, DC (United States): American Society of Mechanical Engineers – ASME, HTR2008, 2008. ISBN 978-0-7918-3834-1.
- [61] ŠTIKA, Milan. *Thorium-uranový palivový cyklus solných reaktorů, Thorium-uranium fuel cycle of molten salt reactors*. Praha, 2010. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [62] PŘEČEK, Martin. *Palivový cyklus solného transmutačního reaktoru*. Praha, 2006. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.

Seznam zkratek

ABWR — advanced boiling water reactor – pokročilý varný reaktor

ALARA – As Low As Reasonably Achievable – mezní užitek (náklady) jaderné bezpečnosti

ALWR – Advanced Light Water Reactor — pokročilý lehkovodní reaktor

AZ – aktivní zóna

CEA – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives – Francouzská atomová agentura

CSA — Coordination & Support Action

DHR — decay heat removal – odvod tepla z ochranné obálky

EDU – elektrárna Dukovany

ETE – elektrárna Temelín

ESBWR — Economic Simplified Boiling Water Reactor – zjednodušený varný reaktor

GFR — Gas-cooled Fast Reactor system – rychlý reaktor chlazený plynem

GIF — Generation IV International Forum

HK – horké komory

HTTR — high-temperature test reactor – zkušební vysokoteplotní reaktor

HTR – high temperature reactor – vysokoteplotní reaktor

HVB – hlavní výrobní blok

IAEA — International Atomic Energy Agency — Mezinárodní agentura pro atomovou energii

LFR — Lead-cooled Fast Reactor system – rychlý reaktor chlazený olovem

LTMA — Long term maintenance agreement

LWR – light water reactor – lehkodvodní reaktor

MAAE – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

MOX – Mixed oxide (Směs UO₂ a PuO₂)

MSR – Molten Salt Reactor system – reaktor chlazený roztavenou solí

MTAEK – maďarský ústav jaderného výzkumu

NCBJ – Narodowe Centrum Badań Jądrowych – polský ústav jaderného výzkumu

NRC – Nuclear Regulatory Commission – americký výbor pro regulaci jádra

PHWR – pressurized heavy-water reactor – těžkovodní tlakový reaktor

PO – primární okruh

RIA – Research & Innovation Action

SCWR – Supercritical-Water-cooled Reactor system – reaktor chlazený vodou s nadkritickým cyklem

SFR – Sodium-cooled Fast Reactor – rychlý reaktor chlazený sodíkem

SKŘ – systém kontroly řízení

SO – sekundární okruh

TRISO – Tristructural-isotropic – třívrstvé kulové palivo

UJV – ústav jaderného výzkumu v Řeži

V4G4 – Visegrád-4 Generation-4 – Projekt společenství států ČR, Maďarsko, Polsko, SR

VHTR – Very-High-Temperature Reactor system – reaktor s velmi vysokými teplotami

VRB – vedoucí reaktorového bloku

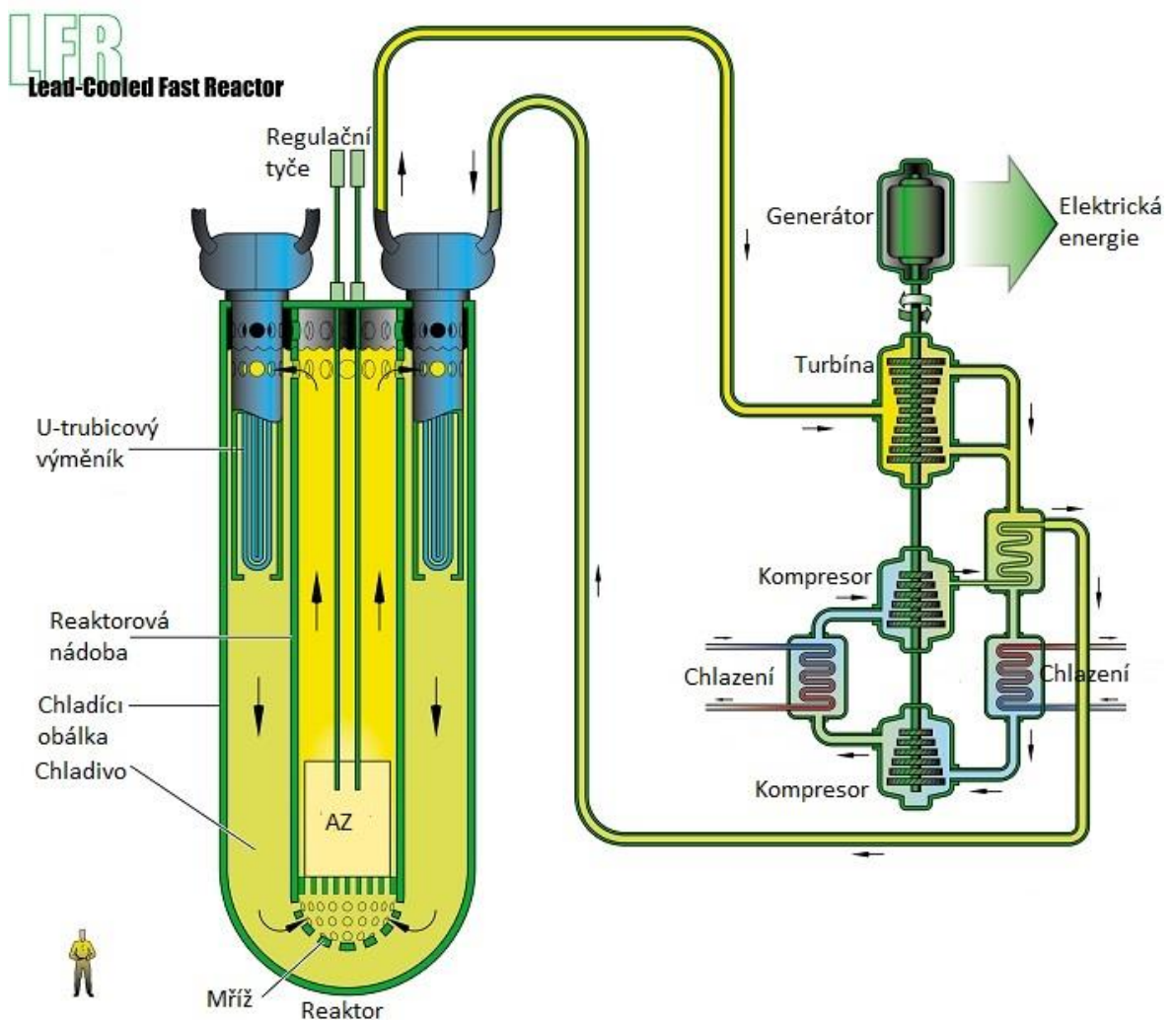
VUJE – slovenský ústav jaderného výzkumu

VVER – водо-водяной энергетический реактор – vodo-vodní energetický reaktor

Příloha

Olovem chlazený rychlý reaktor Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)

Olovem chlazený rychlý reaktor pracuje v oblasti rychlých neutronů a vyznačuje se vysokou provozní teplotou. Odvod tepla probíhá pomocí roztaveného olova nebo eutektickou sloučeninou olova a bismutu (LBE). Díky vlastnostem olova je možné provozovat reaktor při nízkém tlaku, zároveň se jedná o inertní prvek s velmi dobrými termodynamickými vlastnostmi. U tohoto systému je předpokládáno mnoho aplikací od výroby elektřiny přes výrobu vodíku až po výrobu technického tepla. Systémy, na nichž je tento koncept postaven, pochází z provozních zkušeností z francouzských reaktorů Fénix a Super Fénix (reaktory rovněž chlazené olovem), z ruského BREST-OD-300 a zároveň ze systému SSTAR navrženého v USA. [18]



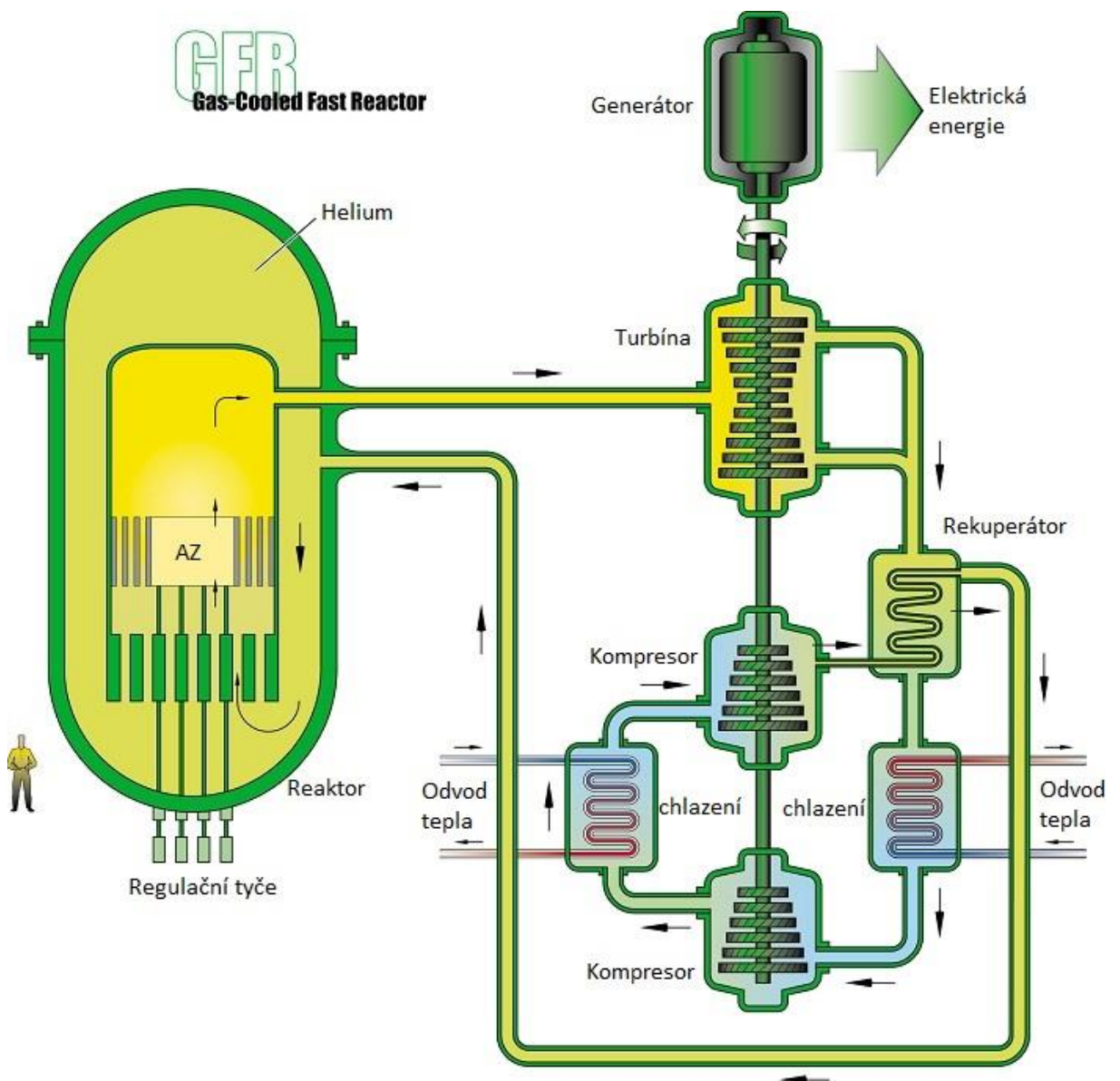
Obr. 23: Schéma LFR [18]

Díky uzavřenému palivovému cyklu pro efektivní konverzi palivového uranu a využití spektra neutronů rychlých energií se LFR vyznačuje výborným managementem materiálu (vysoká míra využití, zkrácení poločasu rozpadu jaderného odpadu). Zároveň může být tento reaktor využit k „vypalování“ resp. konverzi aktinidů s vysokým poločasem rozpadu, které jsou extrahovány z vyhořelého paliva z LWR (lehkovodní reaktor). Nebo naopak může být využit pro konverzi Thoria na štěpný materiál. Důležitým charakteristickým rysem LFR je zvýšení bezpečnosti, jež vyplývá z využití roztaveného olova jako chemicky inertního a zároveň nízkotlakého chladiva. Tyto charakteristiky jsou rovněž příznivé pro riziko těžkých havárií. Z hlediska udržitelného rozvoje je zemská kůra na olovo poměrně bohatá, nic tedy nebrání nasazení této technologie v globálním měřítku. Ještě důležitější vlastností je, jako u dalších rychlých reaktorů, schopnost konverze paliva, a tím zvýšení udržitelnosti tohoto zdroje. Díky velmi vysokému bodu varu olova a jeho příznivě nízké schopnosti interagovat se vzduchem a vodou nabízí z pohledu bezpečnosti koncept LFR značný potenciál. Zároveň, jako u dalších rychlých reaktorů, jde z pohledu paliva o ekonomickou technologii rovněž nevhodnou pro výrobu a šíření jaderných zbraní. [18]

LFR má potenciál v oblasti paliva (resp. jeho rozvíjejícím se potřebám), v ochraně konstrukčních materiálů a v odolnosti proti korozi. V následujících pěti letech je očekáván vývoj materiálu, návrh systému a jeho provozních parametrů. Tato technologie je nyní již testována a stavba demonstrační jednotky probíhá. [18]

Plynem chlazený rychlý reaktor – Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)

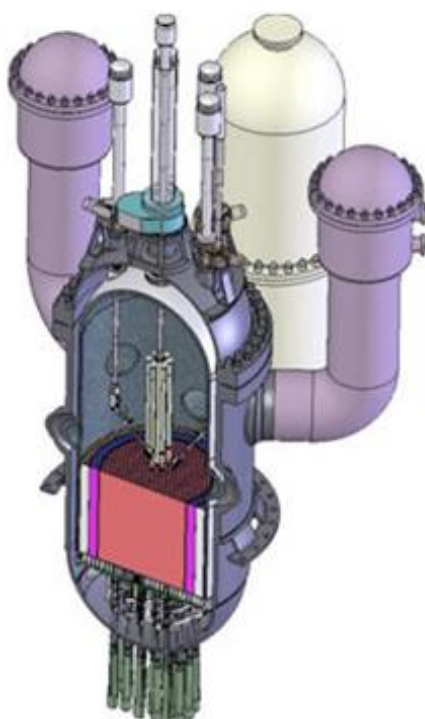
GFR je vysokoteplotní héliem chlazený reaktor s uzavřeným palivovým cyklem provozovaný ve spektru rychlých neutronů. Tento systém v sobě kombinuje výhody reaktoru využívajícího neutronů v rychlém spektru (jednotky MeV), dlouhodobou udržitelnost zdrojů uranu a rovněž se vyznačuje zmenšením objemu odpadů. V jeho případě je počítáno s vícenásobným přepracováním a se štěpením aktinidů s dlouhým poločasem rozpadu. Zároveň díky využívání vysokých teplot na výstupu z reaktoru je počítáno s vysokou účinností a možností využít výstupní teplo pro průmyslové účely (např. výroba vodíku). [17]



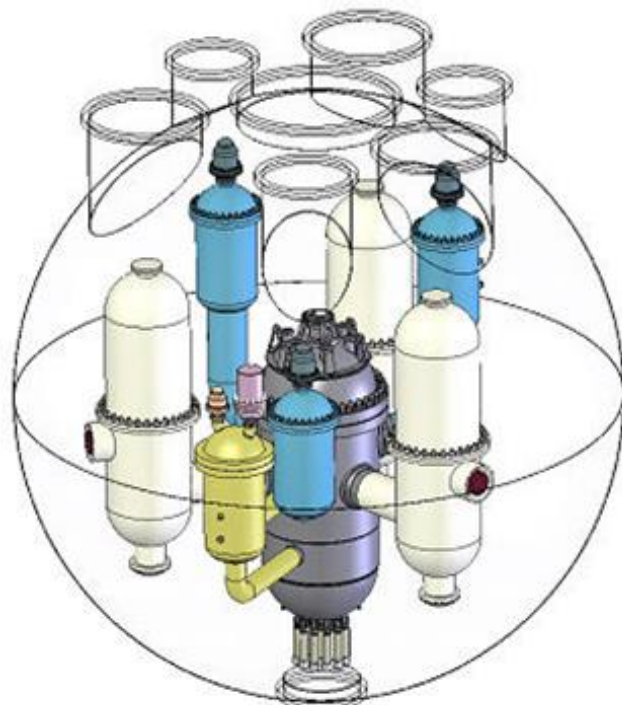
Obr. 24: Schéma GFR [17]

Systém plynem chlazeného rychlého reaktoru (GFR) využívá stejný recyklační palivový proces jako sodíkem chlazený rychlý reaktor (SFR) a stejné reaktorové technologie jako vysokoteplotní reaktor (VHTR). Díky tomu se jeho vývoj může opírat o již známé technologie vyvinuté pro VHTR jako jsou konstrukční parametry, materiály, jednotlivé komponenty a systém pro přeměnu energie. Nicméně si to vyžádá specifický výzkum a vývoj mimo současné a očekávané práce na systému VHTR, především pak na návrhu aktivní zóny a způsobu zajištění bezpečnosti. [17]

Referenční návrh pro GFR počítá ocelovou tlakovou nádobou a výkonem 2400 MWt reaktoru. Aktivní zóna využívá trojúhelníkovou mříž (šestiúhelníky) palivových článků. Palivo bude obsahovat směs karbidu a bude uzavřené v šestiúhelníkovém keramickém pouzdře. Momentálně se jeví jako nejnadějnější konstrukční materiál karbid křemíku a rovněž šestiúhelníková pouzdra vyztužená vlákny karbidu křemíku. Obrázek níže ukazuje aktivní zónu reaktoru umístěnou v konstrukci tlakové ocelové nádoby, obklopené hlavními výměníky tepla a smyčkami pro odvod zbytkového tepla. Celý primární okruh je pak uzavřen v ochranném kontejneru. [17]



GFR - reaktor, chladicí smyčka, výměníky a zařízení na výměnu paliva



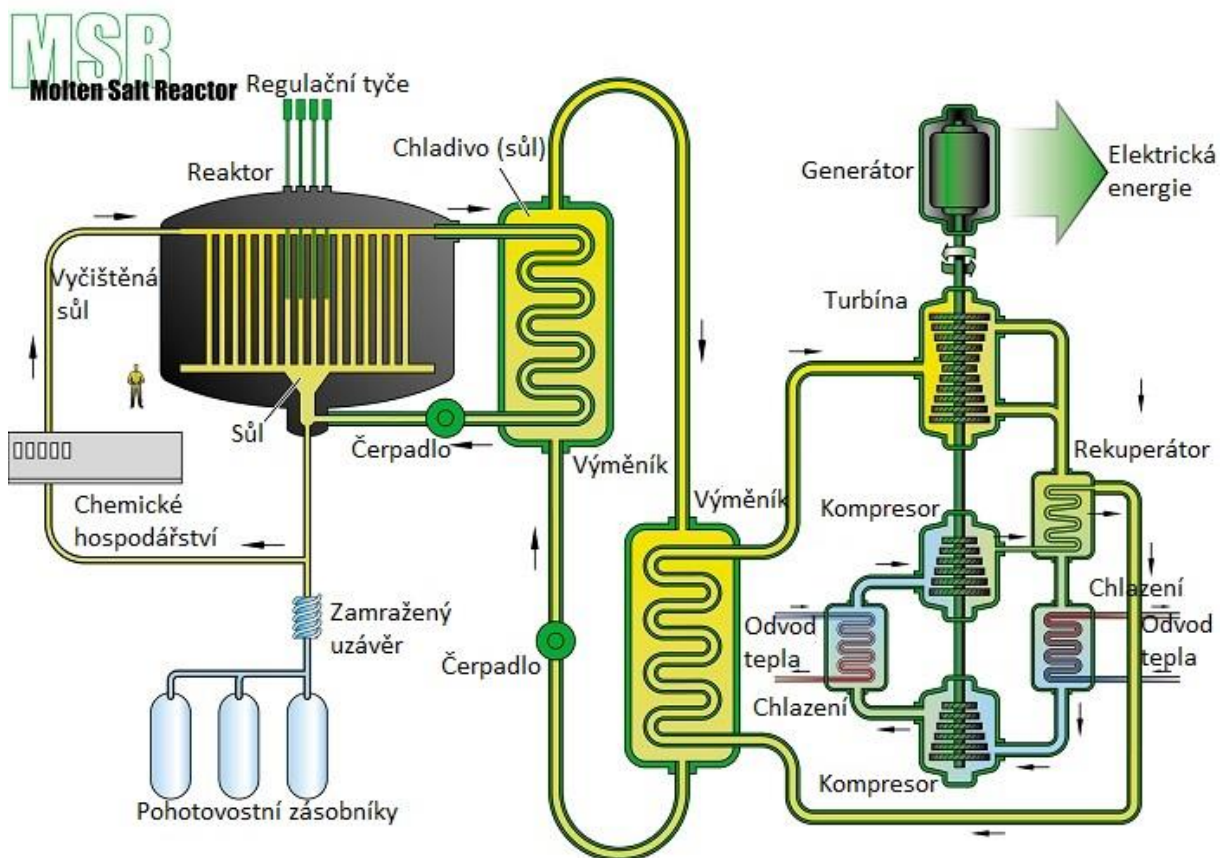
GFR - guard vessel (tlaková nádoba)

Obr. 25: Nákres plánované elektrárny GFR [17]

Jako chladící médium je využíváno helium s předpokladem výstupní teploty reaktoru 850°C. První tepelný výměník převádí teplo z primární heliové smyčky na sekundární stranu, kde slouží jako přenosové médium směs dusíku a hélia, která pak pohání uzavřený okruh plynové turbíny. Zbytkové teplo na výstupu z plynové turbíny pak ohřívá vodu v parogenerátoru, kde vzniká pára, která je následně využívána pro pohon parní turbíny. Takovýto kombinovaný cyklus je běžně využíván v paroplynové elektrárně. Jedná se tedy o zavedenou technologii pouze s tím rozdílem, že v GFR musí být využíván uzavřený cyklus plynové turbíny. [17]

Reaktor chlazený roztavenou solí Molten Salt Reactor (MSR)

V případě MSR se jedná o rychlý reaktor, z jehož aktivní zóny je teplo odváděno pomocí roztavené fluoridové soli. I když může tato technologie působit značně inovativně, byla poprvé testována již před padesáti lety. V dnešní době je především zájem o dlouhodobou alternativu k reaktoru využívajícímu palivo v pevném skupenství štěpícího za pomoci rychlých neutronů. Zařízení umožňuje pyrochemické zpracování a množení štěpného materiálu, ať už ze štěpného izotopu Uranu 238 na štěpný izotop Plutonium 239 nebo z Thoria 232 na Uran 233. Výzkum a vývoj v této oblasti postupuje k řešení proveditelnosti, hodnocení bezpečnosti a stavbě demonstrační jednotky. Hlavní problémy proveditelnosti spočívají ve specifickém bezpečnostním přístupu, určení oxidačně-redukčního potenciálu soli a vývoji regulačních nástrojů k omezení rychlosti koroze konstrukčních materiálů. Je zapotřebí další práce na kontinuálním dávkovém zpracování soli. Mnoho úsilí bude ještě vyžadovat vývoj technologie roztavené soli a s tím souvisejících zařízení. [19]



Obr. 26: Schéma MSR [19]

Technologie reaktoru chlazeného roztavenými solemi byla vyvinuta jen částečně, přičemž vznikly dvě demonstrační jednotky v letech 1950 až 1960 v Oak Ridge National Laboratory. Avšak tyto demonstrační jednotky byly ve skutečnosti tepelné reaktory moderované grafitem. Od roku 2005 se výzkum a vývoj zaměřují na technologii reaktoru chlazeného roztavenými solemi, který ale využívá spektra rychlých neutronů. (MSFR). Tento koncept se snaží kombinovat technologii rychlého reaktoru a s ní spjaté výhody v podobě rozšíření využitelných zdrojů a minimalizace odpadů a zároveň technologii roztavené fluoridové soli jako tekutého paliva a zároveň chladiva, z čehož plynou výhody v podobě nízkého tlaku, vysokého bodu varu a optické průhlednosti aktivní zóny. [19]

Na rozdíl od většiny dříve studovaných reaktorů využívajících roztavených solí MSFR neobsahuje žádný pevný moderátor (obvykle grafit) v aktivní zóně. Tento koncept byl motivován studiem parametrů jako je zpětnovazební koeficient reaktivity, množivý poměr, životnost grafitu a prvotní množství izotopu Uranu 233. MSFR vykazuje výrazně negativní teplotní zpětnovazební koeficient reaktivity [46], takto jedinečná charakteristika zatím u rychlých reaktorů využívajících pevná paliva nebyla nalezena.[19]

Ve srovnání s reaktory na pevná paliva má MSFR nižší zásoby štěpného materiálu, neexistuje zde radiační poškození kvůli snaze o maximální vyhoření paliva, nejsou zde žádné požadavky na výrobu a manipulaci s pevnými palivy a není problém s dosažením homogenního izotopického zastoupení v aktivní zóně reaktoru. Tyto a další vlastnosti vytvářejí z MSFR potenciálně jedinečnou technologii na transmutaci aktinidů s dlouhým poločasem rozpadu a zároveň rozšiřují zdroje paliva na další, do nedávna nevyužívané, možnosti. [19]

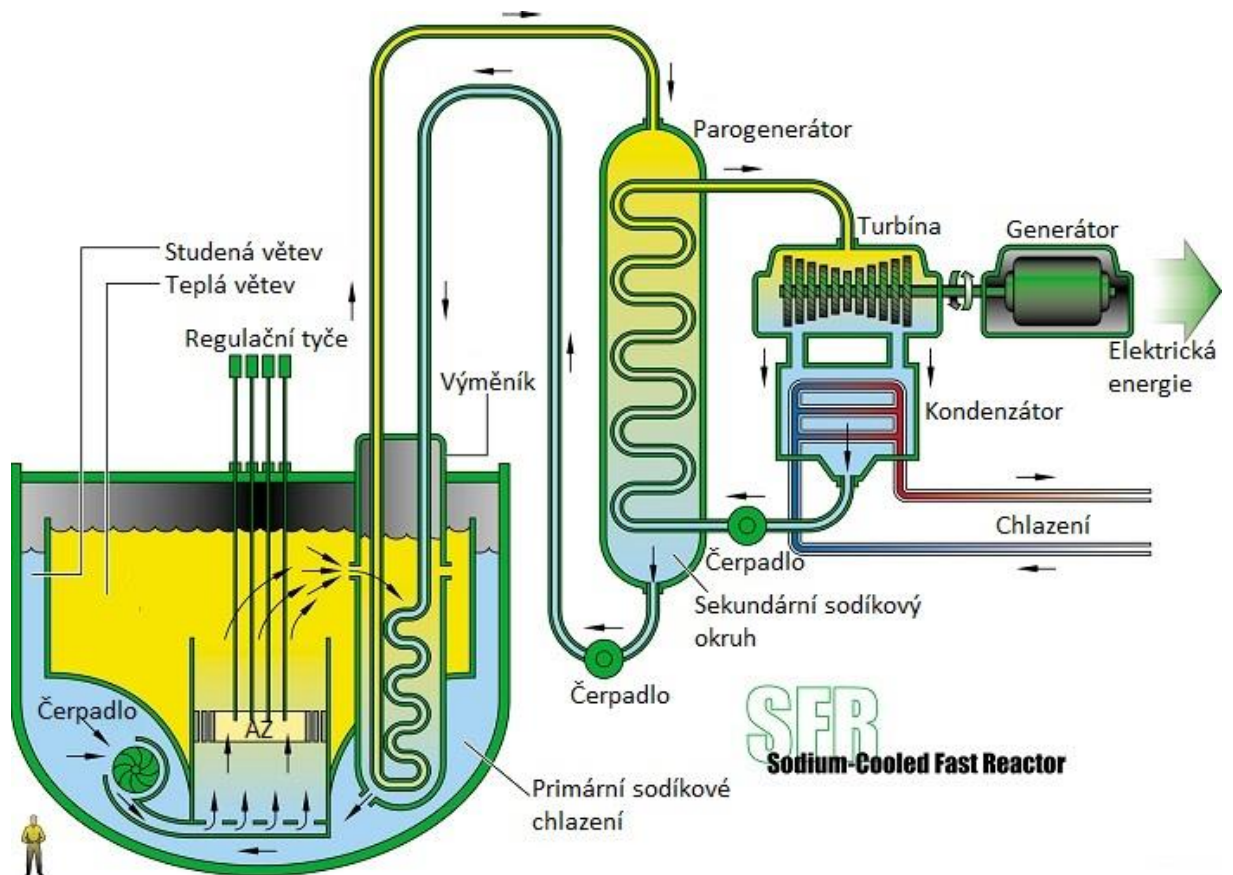
Vývoj ruské verze MSR Molten Salt Actinide Recycler (MOSART) má za cíl být efektivní ve „vypalování“ transuranového (TRU) odpadu z vyhořelého UOX (oxidy izotopu Uranu) a MOX (směs oxidů Uranu a Plutonia) paliva (paliva pro tepelné reaktory na lehkou vodu LWR), tedy štěpení vyhořelého materiálu bez i s podporou Uranu a Thoria. Další koncepty pokročilých reaktorů, které využívají technologii tekuté soli (resp. rychlé

reaktory chlazené tekutými fluoridovými solemi FHSR) jsou ve vývoji. Rovněž se pracuje na podobných vysokoteplotních reaktorech, ovšem chlazených plynem. [19]

Obecně vzato došlo k významnému obnovení zájmu o technologii tekuté soli, jako chladiva pro jaderné i nejaderné aplikace. Tato technologie může značně usnadnit přenos tepla ať už pro výrobu vodíku, koncentrovanou výrobu solární elektřiny, ropné rafinérie nebo třeba pro zařízení na břidlicové zpracování ropy. [19]

Sodíkem chlazený rychlý reaktor - Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

Technologie reaktoru SFR využívá jako chladiva roztaveného sodíku. Využití sodíku umožňuje kompaktní aktivní zónu (vysoká hustota výkonu na malý objem) a provoz reaktoru při nízkém tlaku. Na jednu stranu využití sodíku brání korozi materiálu, na druhou je však nutné mít systém chlazení uzavřený, protože sodík reaguje, jak se vzduchem, tak i s vodou. [20]



Obr. 27: Schéma SFR [20]

Výkon takového reaktoru může být v rozsahu malých výkonů 50-300 MWe, kdy se jedná o modulární řešení, až po zařízení s velkým výkonem až do 1500 MWe. Výstupní teplota aktivní zóny je 500-550 °C, což umožňuje využití materiálů, jež byly vyvinuty a které již prokázaly své dobré vlastnosti v předchozích programech rychlých reaktorů. [20]

Technologie SFR využívá uzavřeného palivového cyklu. To umožňuje regeneraci štěpného paliva a usnadňuje management minoritních aktinidů. To ovšem vyžaduje

vývoj recyklovatelného paliva uzpůsobeného pro takovéto využití. Důležitou bezpečnostní součástí reaktoru čtvrté generace je dlouhá teplotní odezva. Dále pak rozumně vysoká teplota varu chladiva a primární okruh, který pracuje při atmosférickém tlaku. Zároveň, jako u předchozích sodíkových reaktorů, i zde je z bezpečnostních důvodů počítáno s první okruhem radioaktivního sodíku, sekundárním okruhem rovněž sodíkovým a až třetím okruhem pro výrobu elektřiny. Pracovní kapalina terciálního okruhu pro přeměnu energie musí být vybírána s ohledem na tepelnou účinnost, možnost dosažení vysokého výkonu, spolehlivost, bezpečnost a s tím související prověřenost známé technologie. Dalším důležitým aspektem je snížení investičních nákladů, SFR má za cíl být ekonomicky konkurenceschopnou technologií na budoucích trzích s elektřinou. Kromě toho využití rychlého spektra energií neutronů rozšiřuje zdroje Uranu v porovnání s tepelnými reaktory. Vzhledem k předchozím zkušenostem je technologie SFR považována za v nejbližším období nasaditelný systém pro management aktinidů. [20]

Velké množství základních technologií systému SFR je založeno na dřívějších programech rychlých reaktorů. Tyto technologie byly ověřeny při ukončení provozu francouzského reaktoru Phénix, při novém spuštění reaktoru Monju v Japonsku a při prodloužení životnosti BN-600 v Rusku. Mezi nové programy zahrnující technologii SFR patří čínský rychlý experimentální reaktor (CEFR), který byl připojen do sítě v červenci 2011, a rovněž indický prototyp rychlého množivého reaktoru (PFBR), jenž je nyní v testovacím provozu. [20]

Technologie SFR je velmi atraktivní pro státy, které si přejí co nejefektivněji nakládat s omezenými zdroji k výrobě jaderného paliva a zároveň minimalizovat jaderný odpad díky uzavřenému palivovému cyklu. [20]

Díky tomu, že rychlé reaktory využívají neutrony vysokých energií, které jsou účinnější pro štěpení aktinidů, mají v tomto ohledu jedinečnou roli. Hlavní charakteristiky technologie SFR pro management aktinidů jsou [20]:

- Využití transuranů díky uzavřenému palivovému cyklu. To efektivně sníží radiotoxicitu a tepelnou zátěž okolí, čímž usnadní nakládání s odpady a geologickou izolaci.
- Efektivní využití zdrojů Uranu prostřednictvím účinného managementu řízení štěpných materiálů a multi-recyklace.

Vysoká úroveň dosažené bezpečnosti prostřednictvím inherentních [47] a pasivních [47] prvků. To dává významné bezpečnostní rezervy v oblasti přechodových jevů a závažných událostí. [20]

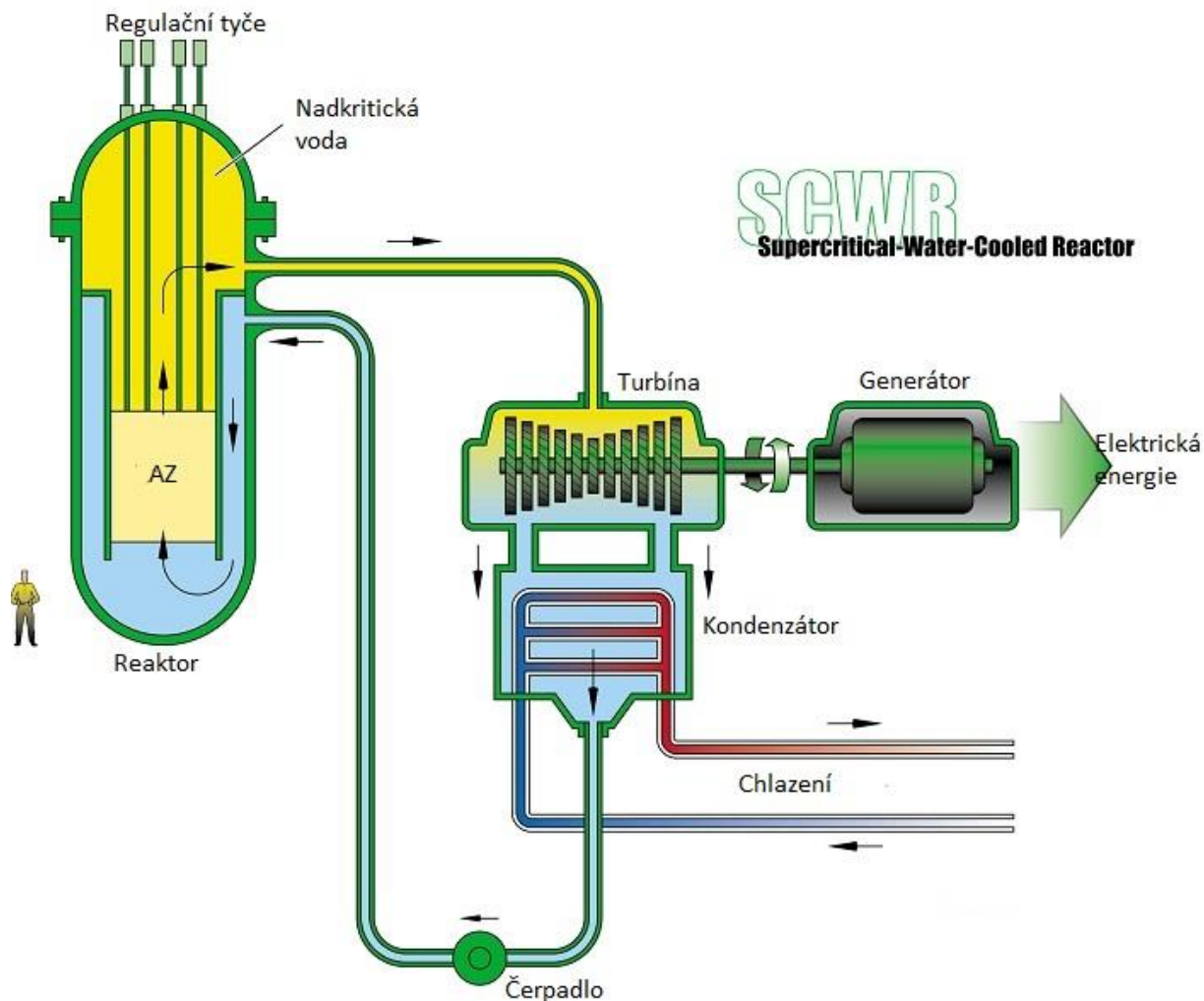
Reaktorový blok může být buď bazénově uspořádán, nebo navržen do kompaktního tvaru smyčky. V tomto směru byly zváženy tři možnosti [20]:

- Reaktor o vysokém výkonu (600-1500 MWe) realizovaný smyčkami. Palivem je oxid uranu nebo plutonia, potenciálně pak minoritní aktinidy. Reaktory podporovaný pokročilým mokřým zpracováním na centrálním místě, které slouží hned pro několik reaktorů.
- Reaktor středního až vysokého výkonu (300-1500 MWe) bazénového typu. Palivo je buď ve formě oxidu, nebo kovového paliva.
- Reaktor nízkého výkonu (50-150 MWe) modulárního typu. Palivo je ve formě zirkoniové kovové slitiny využívající uranu, plutonia a minoritně aktinidů. Reaktor je podpořen palivovými cykly na základě pyrometalurgického zpracování v zařízení integrovaného s reaktorem.

Reaktor chlazený vodou s nadkritickými parametry Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)

SCWR využívá k chlazení vodu o nadkritických parametrech. Jedná se tedy o lehkovodní reaktor, kde je pro odvod tepla z aktivní zóny využívána voda o vysoké teplotě a tlaku (kritický bod vody má parametry 374 °C a tlak 22,1 MPa). [21]

Zda se bude jednat o aktivní zónu reaktoru provozovanou na tepelných (eV) neutronech nebo na rychlých (MeV) neutronech záleží na návrhu základní konstrukce. Tento koncept může být založen na již využívané technologii tlakovodního reaktoru, může tedy převzít technologii tlakové reaktorové nádoby a taktéž potrubí s tím, že bude využívat lehkou (H_2O) nebo těžkou vodu (D_2O). Na rozdíl od běžného reaktoru chlazeného vodou bude chladicí kapalina v aktivní zóně dosahovat daleko vyšší entalpie, což bude mít za následek snížení hmotnostního průtoku pro danou tepelnou energii aktivní zónou a zvýšení entalpie aktivní zóny na přehřáté parametry. [48] Stejně jako u současných tlakovodních reaktorů ani zde není plánováno mezipřihřívání v reaktoru. Stejně jako u varného reaktoru je v návrhu počítáno s expanzí přehřáté páry přímo na vysokotlaké parní turbíně, voda bude následně kondenzovat v kondenzátoru a na závěr bude za pomoci čerpadla vrácena zpět do aktivní zóny reaktoru. To znamená, že koncept SCWR v sobě kombinuje konstrukční a provozní zkušenosti získané ze stovek vodou chlazených reaktorů a rovněž s těmito zkušenostmi ze stovek fosilních elektráren se zkušenostmi s nadkritickými parametry vody (SCW). Na rozdíl od jiných typů jaderných reaktorů čtvrté generace může být tento typ vyvinut postupně, krok za krokem, od stávajících vodou chlazených reaktorů. [21]



Obr. 28: Schéma SCWR [21]

Výhody a výzvy

SCWR mají unikátní parametry, které nabízejí řadu výhod ve srovnání se stávajícím návrhem vodou chlazených reaktorů [21]:

- Koncept SCWR nabízí zvýšení tepelné účinnosti oproti vodou chlazeným jaderným reaktorům současně využívané generace. Účinnost SCWR může dosáhnout 44% nebo více, pro srovnání na současných jaderných elektrárnách dosahuje tepelná účinnost 34-36%.
- S vysokou účinností elektrárny rovněž souvisí minimální počet čerpadel, jež by zvyšovala vlastní spotřebu. Konkrétně můžeme počítat s čerpadly hnacími chladicí kapalinou. Za normálního provozu tedy můžeme počítat s napájecími a kondenzačními čerpadly.

- Oproti konstrukci klasických varných reaktorů není počítáno s parními separátory a sušiči, protože chladivo se přehřívá v aktivní zóně.
- Rovněž kontejnment s nádržemi k potlačení tlaku, systémy havarijního chlazení a systémy odvodu zbytkového tepla mohou být podstatně menší než u stávajících vodou chlazených reaktorů.
- Čím vyšších hodnot entalpie na výstupu z reaktoru pára dosáhne, tím menší velikost turbíny je nutná a z toho plynou menší investiční náklady.

Z těchto obecných charakteristik plynou nižší investiční náklady pro danou jadernou elektrárnu. Zároveň lepší využití paliva a s tím spjaté nižší provozní náklady. To vše dává návrhu SCWR podstatnou ekonomickou výhodu ve srovnání s běžnými lehkovodními reaktory. [21]

Nicméně zde existuje několik technologických problémů spojených s vývojem reaktoru SCWR. Předně je třeba potvrdit přechodné modely o přenosu tepla (popis snížení tlaku od nadkritických do podkritických parametrů)[49]. Dalším problémem je odolnost materiálů, konkrétně pokročilé oceli pro obklady. Rovněž funkčnost pasivních bezpečnostních systémů ještě nebyla demonstrována. [21]

Pokrok do roku 2012

Předprojektové studie návrhu aktivní zóny reaktoru byly provedeny v Japonsku, předpokladem byla výstupní teplota z reaktoru o více než 500 °C při využití tepelného i rychlého spektra neutronů. Obě možnosti jsou založeny na ohřevu chladiva ve dvou mezistupních s intermediálním promícháváním ještě pod mříží aktivní zóny. V případě využití spektra tepelných neutronů je počítáno, že voda bude sloužit nejen jako chladivo, ale zároveň i moderátor. Pokud volba padne na spektrum rychlých neutronů, může být problém s tvrdnutím spektra neutronů minimalizován například použitím zirkonium-hydridové povlakové vrstvy. Předprojektové bezpečnostní analýzy pak počítají s oběma variantami. [21]

V Yamadě byl na základě předprojektové studie proveden návrh tlakové nádoby reaktoru [50]. S ohledem na účinnost, bezpečnost a náklady bylo počítáno s výkonem 1700 MWe. Studie potvrdila čistou výslednou účinnost 44 % a odhaduje potenciál

snížení nákladů o 30 % ve srovnání se současným reaktorem typu PWR. Bezpečnostní prvky by pak měly být obdobné, jako u pokročilých varných reaktorů. [21]

Předprojektový návrh tlakové nádoby byl vyvinut v Evropě, počítáno bylo s výstupní teplotou 500 °C a výkonem 1000 MWe. Návrh aktivní zóny umožňuje ohřívat chladicí kapalinu ve třech mezistupních. Jako dodatečný moderátor nutný pro tepelné spektrum neutronů byla opět zvolena voda. Ta je vedena jak aktivní zónou, tak zároveň jako moderátor i reflektor v prostoru mezi stěnou reaktorové nádoby a aktivní zónou. Konstrukční zkušenosti z Japonska potvrzují studie [51], konkrétně, že účinnost dosáhla 43,5 % a náklady se snížily o 20 až 30 % ve srovnání s nejnovějšími varnými reaktory. Splnění evropských bezpečnostních požadavků (European Utility Requirements) je samozřejmostí. [21]

Zajímavou cestu zvolila Kanada, rozhodla se vyvíjet reaktor typu SCWR, ale kanálového typu. Plánované parametry reaktoru jsou tlak 25 MPa a výstupní teplota z aktivní zóny 625 °C. Zařízení by mělo generovat 1200 MWe (rovněž je uvažována úspornější varianta s výkonem 300 MWe). Jde o modulární koncept, palivo je uzavřeno v kanálech a chladivo a moderátor jsou oddělené. Plánováno je rovněž použít palivové kanály s vysokou účinností. Je zde patrná snaha využít provozní zkušenosti z reaktorů Candu [51]. Jako moderátor bude využívána těžká voda, která bude proudit v samostatném tlakovém potrubí. To vše bude uzavřené uvnitř nízkotlaké nádoby Caladrie. Kromě toho je díky palivovému kanálu s vysokou účinností a oddělených kanálů plánován systém pasivního odvodu tepla a moderace. Další charakteristikou je snaha, v souladu dlouhodobou strategií GIF rozvoje využití thoriového cyklu, využít jako palivo směs oxidu plutonia a thoria. Bezpečnostní systémy kanadského reaktoru typu SCWR jsou podobné jako u ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor). Za zmínku stojí, že díky systému pasivního moderování a chlazení v kombinaci s palivovým kanálem vysoké účinnosti by mohlo dojít k zredukování pravděpodobnosti těžkých havárií, jako je prasknutí tlakové nádoby (large-break), ztráta chladiva z aktivní zóny (loss-of-coolant) nebo výpadek napájení (black-out)[52]. [21]

V roce 2011 byly v Rusku vytvořeny tři předprojektové návrhy tlakové nádoby [53]. Mezi jednotlivými variantami byl rozdíl v plánovaném užívaném spektru neutronů,

tedy aktivní zóny provozované v oblasti tepelné, rychlé nebo smíšené energie neutronů. [21]

Rovněž mezi roky 2007-2012 byly v Číně v rámci výzkumného a vývojového centra (mimo rámec GIF) připraveny dva návrhy aktivní zóny. Jeden model počítal s využitím tepelného spektra neutronů, druhý s využitím smíšeného spektra neutronů. Tyto práce zahrnovaly nejen výzkum v oblasti konstrukce reaktoru, ale zároveň i oblast materiálů, termo hydrauliky, návrh aktivní zóny a paliva, hlavní návrh celého systému (včetně zbytku elektrárny), bezpečnostní systémy a návrh konstrukce palivových tyčí. Rovněž byly zpracovány studie proveditelnosti. Ukázalo se, že tato koncepce má slibné vyhlídky, pokud jde o celkový výkon, možnost výroby komponent a celkovou vyrobiteľnost zařízení. [21]

Na základě získaných údajů z fosilních elektráren je možné predikovat tepelné děje (přestup tepla) v nadkritických systémech. Výpočetní kódy pro složitější tvary palivového souboru jsou rovněž k dispozici [53], ale ještě je třeba ověřit jejich správnost na experimentálním souboru. Také systémové výpočetní kódy přechodové bezpečnostní analýzy byly aktualizovány, aby zahrnovaly i technologii nadkritického reaktoru a to včetně přechodů na normální tlak (odtlakování) do podkritických podmínek. Stabilita proudění v aktivní zóně byla modelována numericky. Tím bylo zjištěno, že stejně jako ve varných reaktorech může být stabilní průtok zajištěn použitím palivových souborů s vhodným tvarem vstupních otvorů. [21]

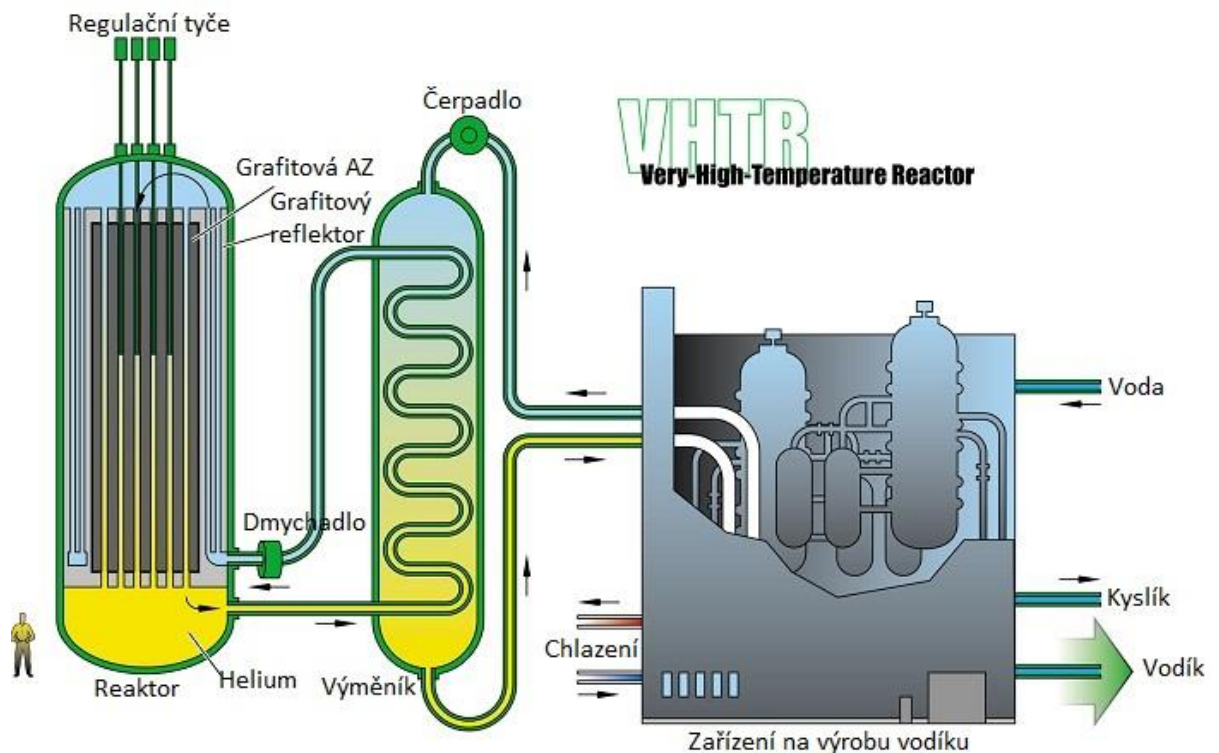
Předpokládané vhodné obkladové materiály byly testovány v kapslích za použití autoklávy a v recirkulačních smyčkách až do teplot 700 °C a tlaku 25 MPa. Očekává se, že nerezová ocel s více než 20 % chromu odolá korozi až do teploty pláště 650 °C. Pro kanadský návrh SCWR je ale nutné pracovat na vývoji slitiny pláště, která bude vhodná i pro teplotu 850 °C. Také je nutné lépe identifikovat podmínky, za kterých chladivo způsobí korozivní praskání materiálu. Bylo prokázáno, že odolnosti proti tečení (creep) může být u stávajících slitin zlepšena přidáním malého množství prvků, jako je například Zirkonium [54]. V delším časovém horizontu oceli, díky disperzi oxidu (oxide dispersion strengthened – ODS), dosáhnou ještě vyššího potenciálu. Na fosilních elektrárnách používané slitiny niklu však pro jaderné elektrárny vhodné nejsou. Může

za to vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů v tepelném spektru, díky tomu se pak u slitin projevuje vydutí (swelling) a křehnutí. [21]

Poslední důležitou oblastí je výzkum chemie vody a vodního hospodářství. Klíčové oblasti výzkumu a vývoje již byly identifikovány [55], jde především o radiolýzu vody a korozní transport prvků (včetně štěpných produktů). V tomto směru jsou velmi cenné provozní zkušenosti s mezipřihříváním radioaktivní páry z ruské jaderné elektrárny Bělojarsk. [21]

Vysokoteplotní reaktor Very-High-Temperature Reactor (VHTR)

Dalším z šestice jaderných reaktorů čtvrté generace navržené GIFem je vysokoteplotní reaktor. Primárním cílem této technologie je nejen produkce elektřiny, ale zároveň, za pomoci elektrochemických nebo hybridních procesů, extrakce vodíku z vody. Díky vysoké výstupní teplotě z reaktoru je tato technologie zároveň atraktivní i pro chemický, ropný a železářský průmysl. Cílem projektu je výstupní teplota 1000 °C, tím může vysokoteplotní reaktor podpořit výrobu vodíku za pomoci termochemické reakce. V základu je vysokoteplotní reaktor palivo TRISO (Tristructural-isotropic) umístěné v grafitovém jádru (grafit slouží jako moderátor i reflektor), chladicím médiem je hélium. Díky nižší koncentraci energie na objem je možné počítat s odvodem zbytkového tepla za pomoci pasivních bezpečnostních systémů díky přirozené konvekci. Potenciál vysokoteplotního reaktoru tedy tkví ve vysoké bezpečnosti, vysoké teplotní účinnosti, nízkých nákladech na provoz a údržbu a možnosti modulárního uspořádání. [22]



Obr. 29: Schéma VHTR [22]

Vysokoteplotní reaktor je dalším evolučním krokem heliem chlazených reaktorů. Jde o grafitem moderovaný, heliem chlazený reaktor využívající ke štěpení neutrony

v tepelném spektru. Tato koncepce je schopna dodávat teplo v rozmezí od 700 °C do 950°C, v budoucnosti pak více než 1000 °C. Uspořádání aktivní zóny je předpokládáno čtvercové, stejně jako u japonského HTTR (high-temperature test reactor), nebo využití palivových koulí jako u čínského HTR-10. Pro výrobu elektrické energie může být buď přímo na výstup z reaktoru napojena héliová turbína, nebo může být přes parogenerátor vyráběna pára a zde již známým Rankin-Clausiovým cyklem [48] převáděna energie přes parní turbínu. V případě využívání technologického tepla pro průmyslové účely, ať už rafinérie, petrochemický průmysl, hutnictví nebo výrobu vodíku, je převod tepla zprostředkován nepřímo, za pomoci výměníku tepla. V případě produkce vodíku je u vysokoteplotního reaktoru možné buď za pomoci termochemických procesů (např. síro-jodový proces [56] nebo hybridní za pomoci síry [56]), nebo elektrolýzou vody za vysoké teploty (high temperature steam electrolysis – HTSE), nebo kombinací tepla, vody a zemního plynu díky technologii parního „reformingu“ (steam reformer technology) [56]. [22]

Původním předpokladem pro technologii vysokoteplotního reaktoru ve čtvrté generaci jaderných reaktorů byla na výstupu vysoká teplota a produkce vodíku. Aktuální poptávka však ukazuje, že výroba elektrické energie a průmyslové procesy založené na páře o vysoké teplotě, které vyžadují nižší výstupní teploty (700-850 °C), mají pro následující desetiletí vyšší potenciál. Zároveň tak redukuje riziko spojené s využitím vyšších teplot na výstupu. Důsledkem tohoto trendu je, že se v posledních několika letech přesunula pozornost od projektů jako je GT-MHR [57] a PBMR [58] na projekty s nižší výstupní teplotou, jako je HTR-PM [59] v Číně a NGNP [60] v USA. [22]

V projektu vysokoteplotního reaktoru můžeme narazit jak na čtvercovou palivovou mříž, tak na koncepci palivových koulí. I když se tvar palivového elementu značně liší, technologický základ je stejný. Konkrétně můžeme mluvit o povlaku paliva TRISO – technologii grafitové matrice, plně keramické (grafitové) struktuře jádra, héliovým chlazením a nízkou hustotou tepelné energie vztažené na objem. Vysokoteplotní reaktor může rovněž podporovat alternativní palivové cykly, jako jsou U-Th [27], U-Pu [62], Pu [62] a MOX [62]. [22]