

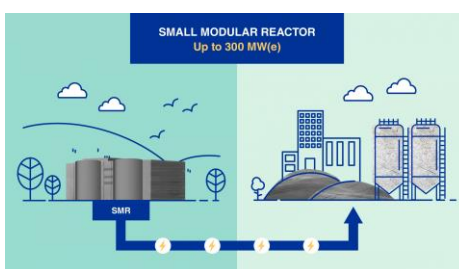
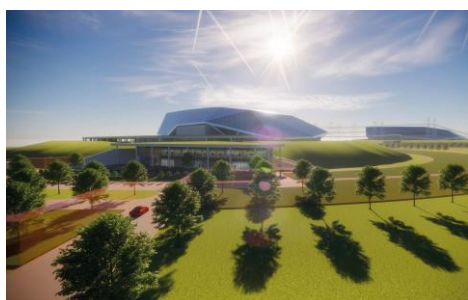
Dokumenttyp RAPPORT		Sida 1 (12)
Datum 2023-02-13	Dokument nr 22121-R01_U1	Rev nr 1.0

Författare Jacob Larsson Nikita Steiner Carl Eriksson Leo Backhouse Lötman Elias Brådenmark	Antal bilagor	
	Granskad Stefan Authén	Godkänd Stefan Authén
Titel Small Modular Reactors med Risk Pilot		

Sammanfattning

Small Modular Reactors (SMR) är ett hett ämne just nu som ofta nämns i samband med diskussioner kring framtidens energiproduktion. Naturligtvis uppstår det många frågor och funderingar när nya tekniker introduceras. Speciellt när det gäller anläggningar som kräver ett genomarbetat och pålitligt säkerhetssystem, för att säkerställa både långvarig drift och produktion samt stöd och trygghet hos allmänheten.

Vi på Risk Pilot ser spännande fram emot tiden då SMR introduceras i den svenska el- och värmeproduktionen och arbetar just nu för att vara del av denna utveckling. I samband med vårt arbete vill vi även utbilda och informera så gott vi kan om vad SMR är för något, fördelarna med SMR jämfört med traditionella kärnkraftverk, samt vilken roll SMR kan spela i den gröna omställningen. Denna rapport ställer de frågor som vi på Risk Pilot anser är de mest pedagogiska och användbara ur perspektivet – "Jag vill lära mig mer om SMR". Till en början kommer fokus att ligga på tekniken/tekniker för att därefter övergå till en bredare omvärldsbild.



Innehållsförteckning

1. Vad är en SMR?	3
2. Varför vill vi bygga SMR:er?.....	3
2.1 Värmeproduktion.....	4
2.2 Vätgasproduktion	4
3. Tekniker	5
3.1 Lättvattenreaktor - NuScale.....	5
3.2 Lättvattenreaktor - BWRX-300.....	6
3.3 Metallkyld snabbreaktor	6
3.4 Smältsaltreaktor	7
3.5 Gaskyld högtemperaturreaktor.....	8
4. Omvärldsanalys	8
4.1 Vilka SMR:er är intressanta just nu?.....	9
5. Kostnad.....	11
5.1 Hur mycket kostar en SMR?.....	11
5.2 Kostnadsjämförelse SMR och traditionella reaktorer.....	11
6. Slutsats	11
7. Referenser	12

1. Vad är en SMR?

Small Modular Reactor/Små Modulära reaktorer (SMR) är ett kärnkraftverk i mindre fysisk skala med lägre effekt jämfört med traditionella kärnkraftverk som idag opererar på t.ex. Ringhals och Forsmark. Typiskt har SMR en effekt på max 300 MegaWatt elektrisk effekt (MWe) jämfört med cirka 1000 MWe och uppåt hos traditionella. En SMR är modulär i den mening att den kan monteras i fabrik för att sedan transporteras till plats. Målet är att producera flera likadana SMR:er vilket ska minska både tiden för tillverkning samt kostnaden för varje enskild enhet.

Det råder dock förvirring kring begreppet SMR. Idag utnyttjas SMR som ett samlingsbegrepp för många olika typer av nya reaktorer. Bland annat små generation III lättvattenreaktorer där effekten har optimerats mot storleks- och/eller kostnadskrav. Även avancerade reaktortyper (med salt, bly, natrium etc. som kylmedel) av generation IV, vanligen kallade AMR, samt modulära reaktorer som kan kopplas ihop till större enheter och som kan kopplas upp mot stamnätet eller agera frikopplat (t.ex. i avlägsna områden). I dagligt bruk utnyttjas SMR slarvigt för samtliga ovanstående typer.



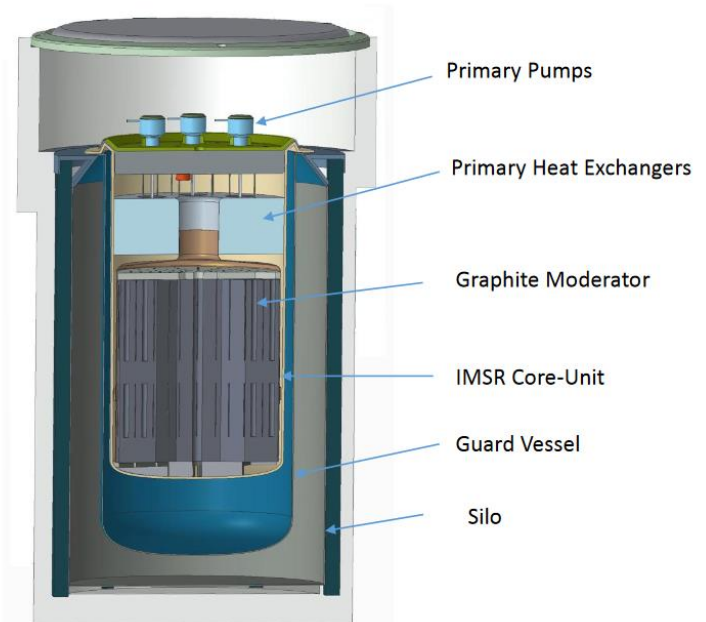
Figur 1. BWRX-300 av GE Hitachi Nuclear Energy [1].

2. Varför vill vi bygga SMR:er?

Ett syfte med SMR är förbättrad säkerhet genom att använda sig av mer passiva och enklare säkerhetssystem jämfört med dagens kärnkraftverk. Detta innebär att säkerhetssystemen inte är beroende av el eller människor för att aktiveras om en olycka skulle inträffa. De går även att placera under marknivå för förbättrad säkerhet mot sabotage och naturkatastrofer. Även bredare användningsområden såsom värmeproduktion eller produktion av vätgas för vissa modeller är en av fördelarna.

Andra syften är att genom minskad storlek kan stora delar pre-fabriceras vilket gör att byggtiden kan förkortas och bättre ekonomi kan därmed erhållas. Små storlekar och lägre enhetskostnader gör det även möjligt att bygga där behovet finns, t.ex. i anslutning till industrier med stort elbehov såsom gruvor, stålverk eller serverhallar.

Slutligen ger de nya typerna av reaktorer som SMR utgörs av möjlighet till integrering och samverkan med andra energislag i lokala och globala energisystem, t.ex. genom tillvaratagande av restvärme för uppvärmning av fastigheter via fjärrvärme eller produktion av vätgas för ersättning av fossila bränslen m.m.



Figur 2. IMSR av Terrestrial Energy [2].

2.1 Värmeproduktion

Nackdelen med värmeproduktion jämfört med elproduktion är att el kan transporteras medan värme måste produceras lokalt. Tack vara minskad storlek och därmed större möjligheter av val av placering kan SMRer spela en stor roll i framtidens miljövänliga värmesystem. Eftersom en SMR har olika syften, t.ex. elproduktion och värmeproduktion, kan de användas flexibelt i ett elsystem tillsammans med förnybara energikällor. De dagar då efterfrågan av el tillgodoses av vind, vatten och sol kan reaktorerna byta från elproduktion till andra tillämpningar exempelvis värmeproduktion.

2.2 Vätgasproduktion

Stålindustrin står inför en omställning att tillverka fossilfritt stål med hjälp av vätgas, där målet är att framställa vätgas genom vattenelektrolys. I dagens läge är det vindkraft som står i fokus vad gäller vätgasproduktion men SMR indikerar att spela en stor roll i framtiden med en mer effektiv process.

Elektrolys av vatten producerar vätgas endast med hjälp av elektricitet med en effektivitet på cirka 50-70%. SMR kan istället använda het ånga för att konvertera cirka 90% av den använda elektriciteten till vätgas genom en process som kallas High Temperature Steam Electrolysis, HTSE. För att HTSE ska fungera krävs en temperatur på 600-800 grader Celsius vilket är möjligt med exempelvis en gaskyld högtemperatur reaktor eller en smältsaltreaktor. Ånga på över 800 grader Celsius möjliggör framställning av vätgas utan elektricitet och endast värme, termolys.

3. Tekniker

På Risk Pilot har vi tittat närmare på 4 olika sorters små modulära reaktorer, 1) Lättvattenreaktor, 2) Metallkyld snabbreaktor, 3) Smältsaltreaktor och 4) Gaskyld högtemperaturreaktor. Den som ligger närmast i tid att realiseras är lättvattenreaktorn. Små modulära lättvattenreaktorer använder precis som de flesta vanliga reaktorerna vatten som moderator och kylvätska. Det finns två typer av SMRer som använder lättvatten, Boiling Water Reactor (BWR) och Pressurized Water Reactor (PWR).

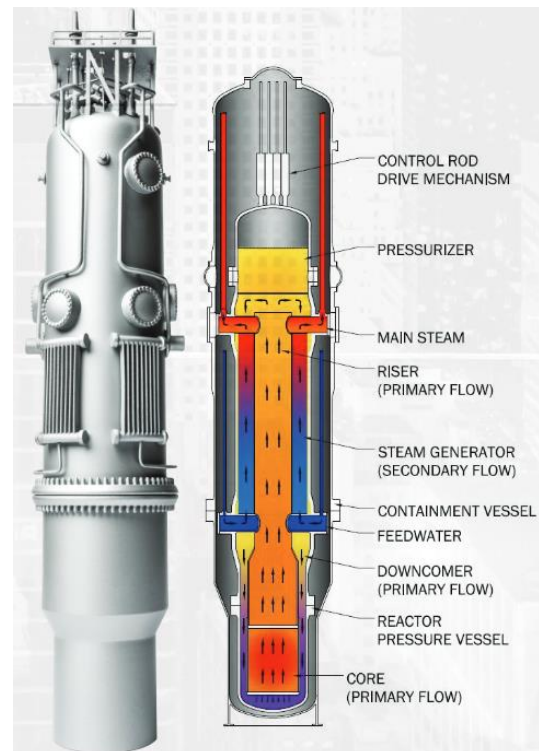
NuScale är en PWR SMR med cirka 70 MW elektrisk effekt och 150 MW termisk effekt. Kylvattnet cirkulerar naturligt utan behov av huvudkylpumpar, vilket minskar storleken på primärsystemet och därmed hela reaktorn.

BWRX-300 är en BWR SMR som utvecklas i samarbete mellan General Electric och Hitachi. BWRX-300 planeras ha 300 MW elektrisk effekt samt två stycken passiva säkerhetssystem. OPG, Ontario Power Group är en kanadensisk energiproducent som i dagarna sätter spaden i marken för byggnation av den första i en flotta av många BWRX-300 reaktorer.

Metallkylda snabbreaktorer och smältsaltreaktorer tillhör den nya fjärde generationens avancerade reaktorer (AMR) med högre krav på inbyggd säkerhet, effektivitet, kortare tid för förvaring av avfall samt ekonomiskt konkurrenskraftiga gentemot dagens kärnkraft.

3.1 Lättvattenreaktor - NuScale

NuScale är en av de SMR:er som ligger närmast att tas i drift och är den första kommersiella SMR:en att bli godkänd av NRC (Nuclear Regulatory Commission i USA) och deras säkerhetskrav. NuScale är en lättvattenreaktor med cirka 150 MW termisk effekt och 70 MW elektrisk effekt där ett kraftverk planeras innefatta 1 till 12 oberoende reaktorer i en reaktorpool, styrda från samma kontrollrum. Primärflödet inuti reaktorn drivs av naturlig cirkulation på grund av temperaturskillnader vilket minskar storleken på primärkretsen då det inte behövs några pumpar. Hela primärkretsen installeras i ett litet reaktortryckkärl vilket möjliggör minskad storlek för hela enheten. I händelse av felfunktion finns det tillräckligt med vatten i reaktorpoolen för att kyla enheterna under de första 72 timmarna.

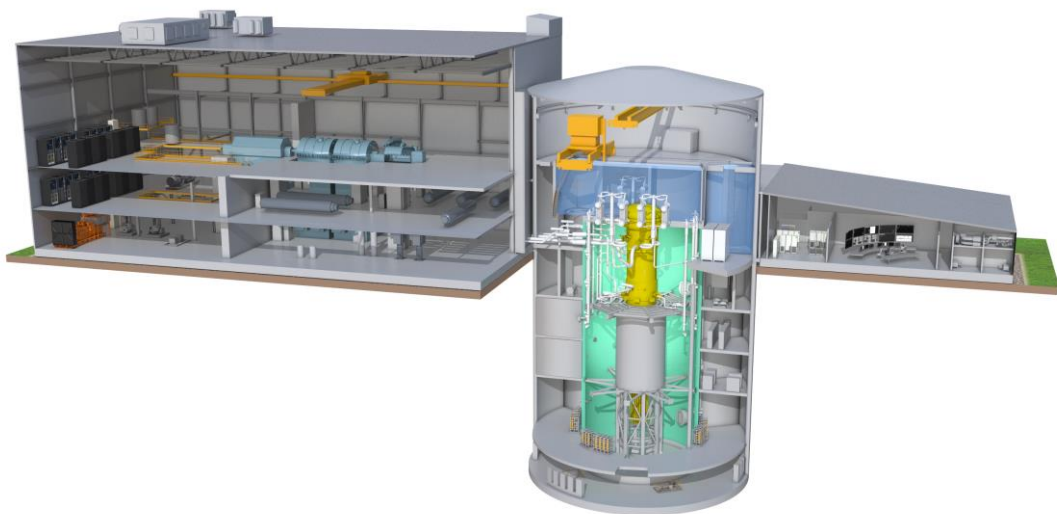


Figur 3. Nuscale SMR [3].

3.2 Lättvattenreaktor - BWRX-300

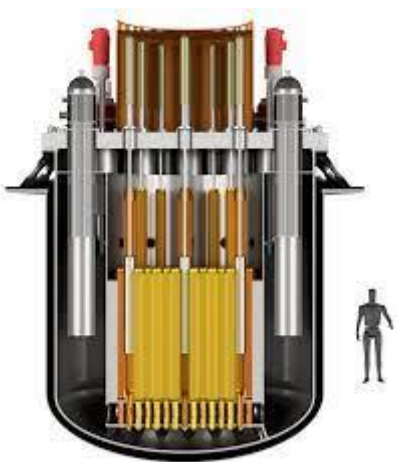
BWRX-300 är produkten av ett samarbete mellan General Electric och Hitachi. Reaktorn är konstruerad för att ha en effekt på 300 MW elektrisk effekt och med passiva säkerhetsfunktioner.

De två passiva säkerhetsfunktionerna är isoleringskondensorsystemet (ICS) och det passiva inneslutningskylsystemet (PCCS). ICS arbetar direkt efter eventuell reaktorisolering och tar bort sönderfallsvärme från reaktortryckkärlet för att hålla trycket lågt. PCCS tar också bort sönderfallsvärme för att hålla inneslutningen inom sina gränser. Systemet består av flera värmeväxlare upphängda i det trycksatta inneslutningskärlet.



Figur 4. BWRX-300 Small Modular Reactor [1].

3.3 Metallkyld snabbreaktor

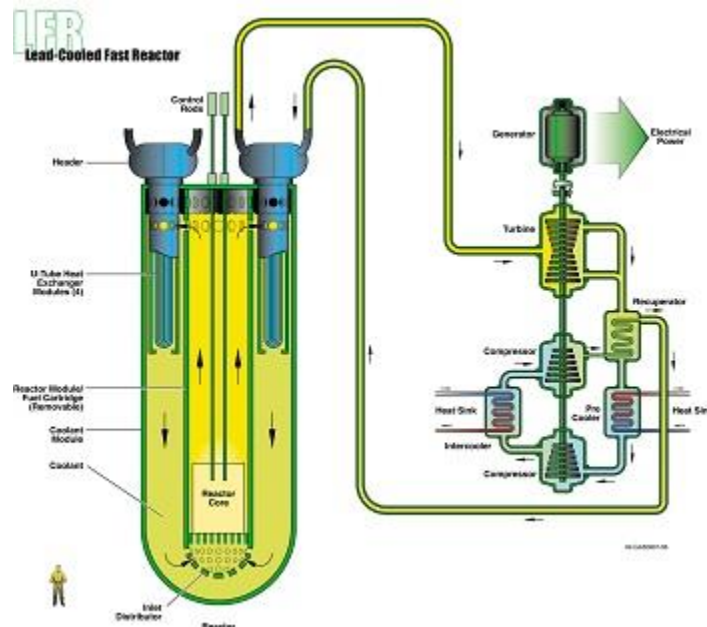


Figur 5. Minireaktor Sealer.
Illustration: Blykalla reaktorer [4].

I en metallkyld snabbreaktor finns det ingen moderator för att bromsa neutronerna. Oftast kyls de av någon typ av flytande metall som natrium, bly eller blyvismut eftersom neutronmoderationen på grund av dessa metaller är mycket låg. Det finns en del fördelar med detta jämfört med vanliga reaktorer. Exempelvis kan snabbreaktorer använda kärnavfallet från konventionella reaktorer som bränsle och på grund av användningen av flytande metaller som kylmedel är vissa passiva säkerhetsfunktioner möjliga så som passivt avlägsnande av sönderfallsvärme med hjälp av naturlig konvektion av reaktorns kylvätska.

Metallkylda snabbreaktorer är relativt små i sig och att behöver inte nödvändigtvis kategoriseras som en SMR. Eftersom de redan uppfyller de flesta kraven på storlek och modularitet i den

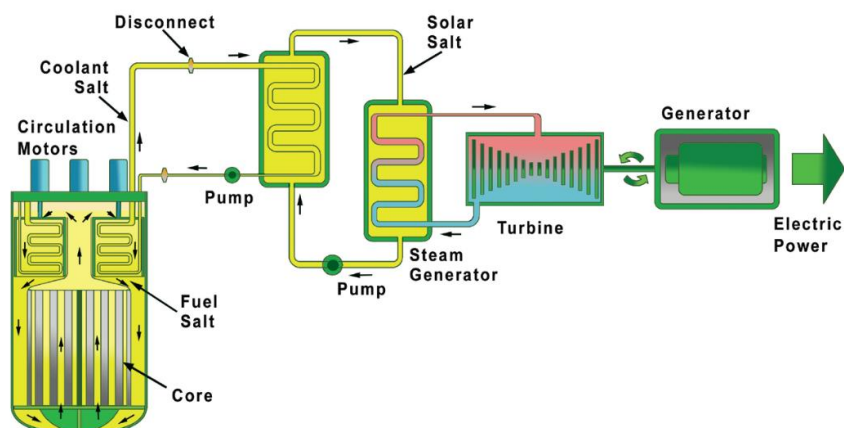
mening att flera reaktorer kan placeras på samma ställe, är alla metallkylda snabbreaktorer SMRer.



Figur 6. Generisk metallkyld snabbreaktor [5].

3.4 Smältsaltreaktor

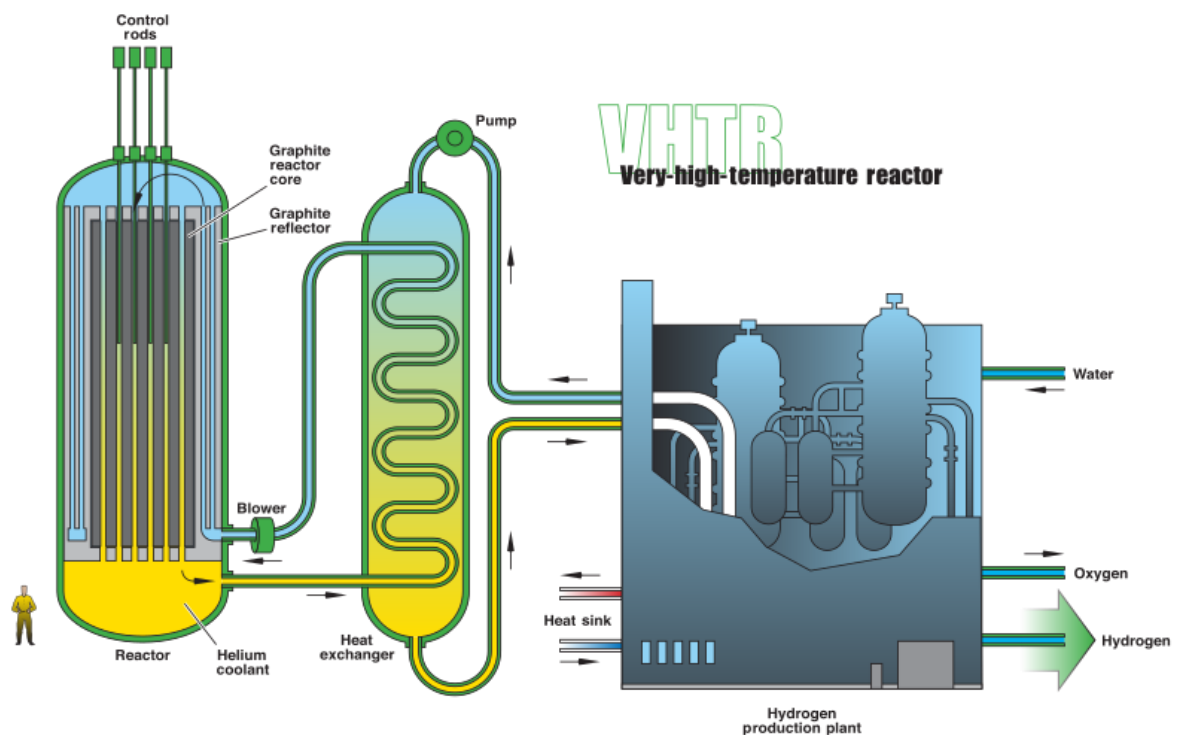
Smältsaltreaktorer kan fungera på två olika sätt. Den ena använder smältsalt som kylmedel med fast kärnbränsle i grafit. Den andra löser upp bränslet i saltet, vilket innebär att det smälta saltet fungerar som både kylvätska och bränsle, modererat av grafitstavar. De vanligaste salterna som används som kylmedel är litiumberylliumfluorid och litiumfluorid, med torium, uran och plutonium alla lämpliga att lösa i saltet. Fördelar med att använda smält salt jämfört med vatten är möjligheten att arbeta vid en mycket högre temperatur, där salterna förblir flytande från 500°C upp till 1400°C utan trycksättning. Högre driftstemperatur leder till högre effektivitet vid generering av el och lägre tryck ökar säkerheten på grund av den minskade risken för olyckor med kylmedelförlust.



Figur 7. Generisk smältsaltreaktor [2]

3.5 Gaskyld högtemperaturreaktor

Gaskylda Högtemperaturreaktorer använder gas som kylmedel, främst helium, och grafit som moderatör. Användningen av gas som kylmedel möjliggör en driftstemperatur i intervallet 700-950°C, vilket är mycket högre än den för lättvattenreaktorer. Högre temperatur innebär att reaktorn även kan användas till uppvärmning och väteproduktion utöver elproduktion. Konstruktionen möjliggör passiv kylning på grund av naturlig konvektion, detta tillsammans med designen av bränslet, grafitmoderatorns termiska tröghet samt användning av helium i gasfas gör reaktorn i sig säker, vilket innebär att förutsättningarna för en härdsmläta inte kommer att nås även utan mänsklig inblandning för någon designbaserad olycka. Två olika designar är förekommande där den ena, likt BWR och PWR, placerar bränslet i stavar som staplas inuti grafitelement. Den andra använder en stenbäddsdesign, där sfäriska bränslepartiklar med en radie på cirka 50 mm sätts in i reaktorn omgiven av grafitmoderatorn. Detta möjliggör för bränslebyte under drift.



Figur 8. Generisk gaskyld högtemperaturreaktor [6].

4. Omvärldsanalys

I den andra delen i Risk Pilots arbete med SMR:er har vi utfört en omvärldsanalys i syfte att lära oss om vad som händer i världen just nu, vilka företag som är aktuella, vilken reaktorteknik de är intresserade av och hur långt de har kommit med att få fram deras första SMR. I detta avsnitt informerar vi även om övriga aspekter, utöver teknik, som är intressant om de olika reaktortyperna. Exempelvis kostnad, om det finns tillgängligt, samt företagshändelser och licensieringsprocessen.

Generellt sett är utvecklingen av lättvatten-SMR:er baserade på PWR-teknik längst framskriden i utvecklingen och även i vissa fall utbyggnaden. Den grundläggande PWR-tekniken är väletablerad men många av de SMR:er som förväntas vara under utveckling innehåller nya lösningar vad gäller passiva säkerhetsfunktioner och integrerade konstruktioner med huvudkomponenter inne i reaktorns tryckkärl.

Utvecklingen av övriga tekniker av intresse, så som BWR, snabba neutronreaktorer med metallkylning, gaskylda reaktorer och smältsaltreaktorer, är generellt inte lika långt kommen och osäkerheterna är större med tanke på när de ska implementeras och bli operativa.

4.1 Vilka SMR:er är intressanta just nu?

Nedan har vi listat de SMR:er som är under utveckling i världen just nu och som vi anser är intressant att titta vidare på, oavsett om det befinner sig i ett konceptstadium eller i licensieringsprocessen.

Tabell 1. Omvärldsanalys av SMR:er.

Design	Land	Kostnad per kW	Kostnad per kWh	Typ	Horisont
SMART from KAERI	Sydkorea	\$4000/kWe	-	LWR	Utvecklingen är långt framskriden
Rolls-Royce SMR	UK	\$5100/kW	-	LWR	Utvecklingen är långt framskriden
Holtec SMR-160	USA	\$3750/kWe	-	LWR	Utvecklingen är långt framskriden
BWRX-300	USA	\$2250/kWe	-	LWR	Utvecklingen är långt framskriden
NuScale	USA	\$2850/kW	-	LWR	Utvecklingen är långt framskriden
SMART from Dunedin	Canada	-	29c/kWh	LWR	Tidigt utvecklingsstadium
SEALER	Sweden/Canada	-	-	FNR (metal)	Utvecklingen är långt framskriden
Integral Fast Reactor, ARC-100	USA	-	\$50/MWh	FNR (metal)	Utvecklingen är långt framskriden
PRISM, Natrium	USA	-	-	FNR (metal)	Utvecklingen är långt framskriden
Urenco U-Battery	UK	-	-	HTR	Utvecklingen är långt framskriden

USNC Micro Modular Reactor	USA	-	10 ¢/kWh	HTR	Utvecklingen är långt framskriden
X-energy Xe-100	USA	-	-	HTR	Utvecklingen är långt framskriden
EM2	USA	-	-	Hybrid : Fast-neutron HTR (gas cooled)	Tidigt utvecklingsstadium
GA-Framatome Fast Modular Reactor	USA	-	-	Hybrid : Fast-neutron HTR (gas cooled)	Tidigt utvecklingsstadium
Integral MSR	Canada	-	-	MSR	Utvecklingen är långt framskriden
Seaborg Compact Molten Salt Reactor	Denmark	-	-	MSR	Utvecklingen är långt framskriden
Moltex SSR	USA	-	-	MSR	Utvecklingen är långt framskriden för en SSR-W ¹
ThorCon	USA	-	-	MSR	Tidigt utvecklingsstadium

Ordlista

- LWR: Light Water Reactor - Lättvattenreaktor
- FNR: Fast Neutron Reactor - Snabbneutronreaktor
- HTR: High Temperature Reactor - Högtemperaturreaktor
- MSR: Molten Salt Reactor - Smältsaltreaktor

¹ SSR-W: Stable Salt Reactor - Wasteburner.

5. Kostnad

Kostnaden för en SMR är en av de viktigaste anledningarna till att intresset är så stort. Genom serietillverkning av flera likadana reaktorer sjunker kostnaden då processer förbättras iterativt. Den mindre fysiska storleken jämfört med ett traditionellt kärnkraftverk minskar den totala kostnaden för en enhet vilket ger incitament för privata aktörer att investera.

5.1 Hur mycket kostar en SMR?

De SMR:er som vi har hittat kostnader för i vår omvärldsanalys är uppskattade kostnader från företagen själva. De rör sig mellan 5100 och 2250 dollar per installerad kW. Större kärnkraftverk, exempelvis Olkiluoto 3 i Finland, Flamanville 3 i Frankrike och Vogtle 3 & 4 i USA ser alla ut att landa runt 10 000-12 000 dollar per kW. Dessa projekt är dock drabbade av stora förseningar vilket har ökat kostnaderna avsevärt. I Exempelvis Japan och Sydkorea har de senaste reaktorerna istället kostat mellan 4000-2000 dollar per kW.

5.2 Kostnadsjämförelse SMR och traditionella reaktorer

Tabellen nedan jämför kostnader för vad en SMR kan tänkas kosta och hur mycket traditionella reaktorer har kostat att bygga.

Tabell 2. Kostnadsjämförelse i dollar per installerad effekt.

Design	Land	SMR?	Effekt	Total kostnad
SMART from KAERI	Sydkorea	JA	100MWe	\$4000/kWe
Rolls-Royce SMR	UK	JA	440MWe	\$5100/kWe
Holtec SMR-160	USA	JA	160MWe	\$3750/kWe
BWRX-300	USA	JA	300MWe	\$2250/kWe
NuScale	USA	JA	77MWe	\$2850/kWe
Olkiluoto 3	Finland	Nej	1600MWe	\$7250/kWe
Flamanville 3	Frankrike	NEJ	1600MWe	\$8875/kWe
Vogtle 3 & 4	USA	NEJ	1117MWe	\$12 760/kWe

6. Slutsats

Detta dokument är en sammanställning av det arbete som vi på Risk Pilot har utfört om SMR:er under 2022, med syfte att sprida vår samlade kunskap på ett förhoppningsvis lättvis men även djupare för den intresserade. 2023 och framgent är en spännande tid inom ämnet SMR och vi kommer att fortsätta att fördjupa oss och lära oss mer, med förhoppningen att faktiskt börja arbete med SMR:er.

7. Referenser

Bilder

1. GE Hitachi Nuclear Energy, HITACHI, 2022, *BWRX-300*, <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300> (Hämtad 2022-12-13)
2. IAEA, 2016, *Status Report - IMSR-400*, <https://aris.iaea.org/PDF/IMSR400.pdf>
3. Nuscale Power, 2022, *Nuscale Small Modular Reactor*, <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>
4. Uniper Energy, 2021, *Nu tar vi kärnkraften in i framtiden*, <https://www.uniper.energy/sverige/nyheter/nu-tar-vi-kaernkraften-in-i-framtiden/> (Hämtad 2022-12-13)
5. Gen IV International Forum, 2022, *Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)*, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42149/lead-cooled-fast-reactor-lfr (Hämtad 2022-12-13)
6. Gen IV International Forum, 2022, *Very-High-Temperature Reactor (VHTR)*, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr (Hämtad 2022-12-13)