

Razvoj nuklearne energetike kao doprinos smanjenju efekta staklenika

Mr.sc. Krešimir Komljenović, dipl.inž.el. MBA
Senka Ritz, dipl.ing.bio.



Sadržaj

Uvod

ThorconIsle

Prednosti ThorConIsle designa

Nuklearna Sigurnost

Zamjena Goriva

Cijena električne energije i mogućnost proizvodnje elektrana

Utjecaj na emisije CO2

Trenutni status ThorConProjekta



Uvod – što je ovo?



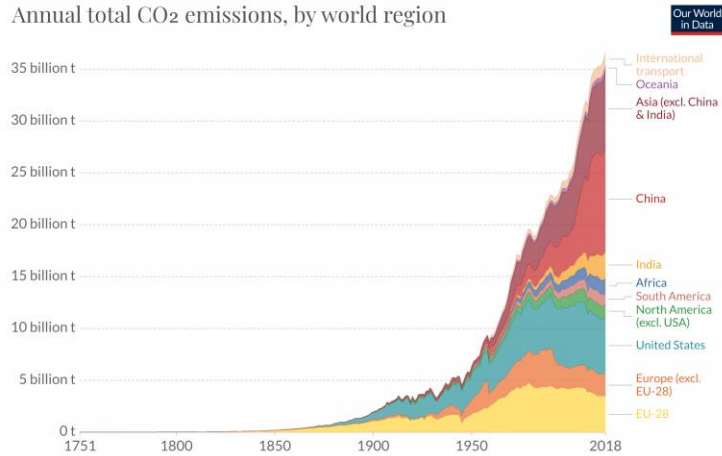
Uvod

- Prema BP review world energy 2021, covid epidemija imala je dramatičan utjecaj na energetska tržišta, sa rekordnim padom potrošnje primarne energije i emisija CO2 od WW2
- Ipak, obnovljiva energija nastavila je rasti sa npr. rekordnim rastom instaliranih solarnih kapaciteta, uz ukupan porast obnovljivih 2.9 EJ (ne HE)
- 2020 potrošeno je 556,63 EJ P.E., što je bio pad od 4,5%. 1.00 EJ= Grčka
- Prosječan desetljetni porast je bio: 1,9% (0.7%/stan.), kao nova Francus.
- 2020 ispušteno je: 32 384 Mrd t CO2. (- 6,3%). RH = 16 Mrd t.
- Prosječan godišnji porast je bio 1,4% (emisijski kao nova Italija)
- Naša ukupna energetska potrošnja odgovara angažmanu 93 energetska roba snage 100W koji rade 24/7, po stanovniku planete, kojih je 7,9 Mrd
- Promjene 2010-2019. godišnje:
- Ukupno: +8,5EJ; NE -0,1 EJ; HE: +0,6; obn: +2.2 EJ;
- fosilne: plin: +3,0 EJ; ugljen*: +1,9 EJ; tekuće: +2,2 EJ
- * *Za ugljen je proizvodnja umjesto potrošnje pa suma ne odgovara*



Uvod

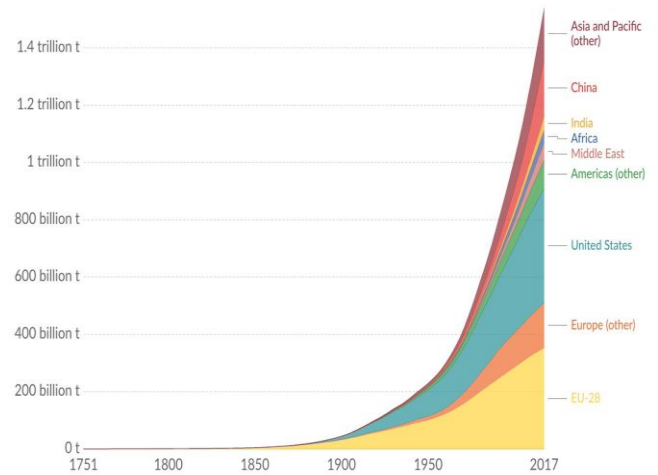
Annual total CO₂ emissions, by world region



Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC); Global Carbon Project (GCP)
Note: 'Statistical differences' included in the GCP dataset is not included here.
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

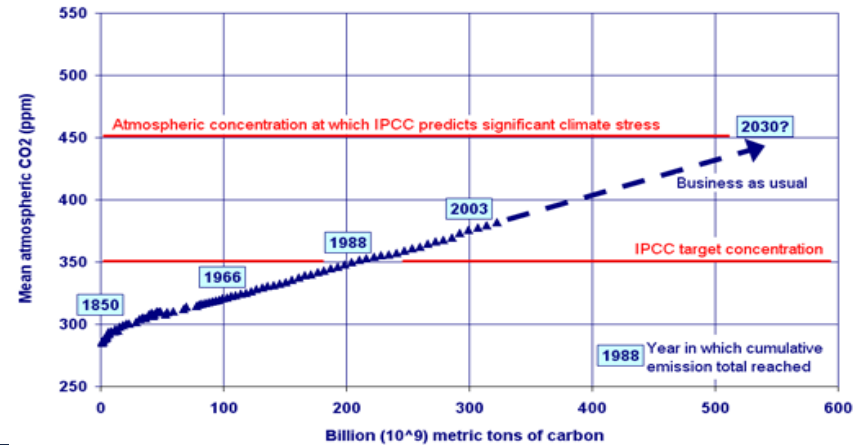
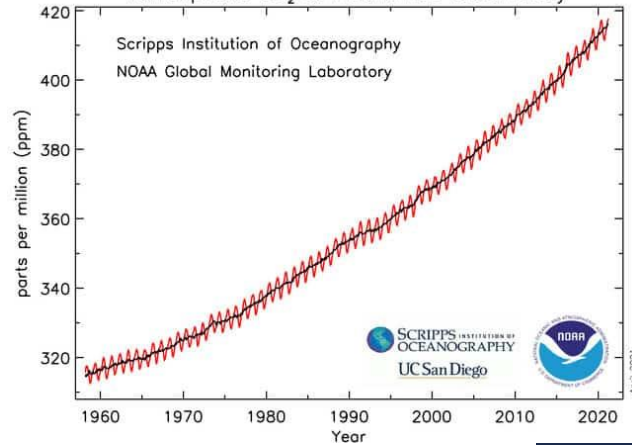
Cumulative CO₂ emissions by world region

Cumulative carbon dioxide (CO₂) emissions by region from the year 1751 onwards. Emissions are based on territorial emissions (production-based) and do not account for emissions embedded in trade.



Source: OVID based on CDIAC & the Global Carbon Project (2018) OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



15.

SAVJETOVANJE HRO CIGRE
HRO CIGRE SESSION
 ŠIBENIK, 7.–10. STUDENOGA 2021./NOVEMBER 7–10, 2021

100 GODINA MEĐUNARODNE CIGRE • 30 GODINA HRO CIGRE • 70 GODINA CIGRE U HRVATSKOJ
 165 GODINA OD ROĐENJA NIKOLE TESLE • 100 GODINA KONČARA • 135 GODINA SIEMENSA • 70 GODINA ČASOPISA ENERGIJA

Uvod

- Fatih Biroi, IEA: usprkos velikom porastu obnovljivih izvora, globalne emisije rastu, potrebna je odlučnija akcija
- Potrebno je: trenutno zaustaviti investicije u naftu, plin i ugljen te zabraniti motore s unutrašnjim sagorijevanjem prije 2035
- Status prirodnog plina kao prijelaznog goriva nije još definiran
- Problem s plinom je ispuštanje metana, koji je 30-tak puta jači staklenički plin od CO₂. 2% „curenja” je već jači CO₂ otisak. Zadržavanje CH₄ u atmosferi je srednjeročno, no moguće su pozitivne povratne petlje
- Kad bi postojale velike količine el.en. bez utjecaja na okoliš, elektrifikacijom bi se većina energetske potrebe riješila (najteže avionski i brodski promet)
- Fuzija je već 50 godina „50 godina daleko”
- Traži se: cjenovno prihvatljivo, politički prihvatljivo, lokacijski povoljno, ne rizično rješenje
- Na prvi pogled, NE se čine ne-perspektivnim. Fukushima (ali 0 mrtvih)
- Sadašnji koncept reaktora – nije masovno zaživio. Projekti dugotrajni i skupi
- Koncept razvoja diktiran vojnom mornaricom USA. Neki povijesni koncepti napušteni



ThorConIsle

- Plutajuće elektrane – uobičajene. Podmornice i ledolomci. NE Pevek, Rus
- Plutajući objekti nemaju NYMBI problem. Izvedba je manje kompleksna
- Iskustvo gradnje klasičnih NE u zapadnim zemljama - sve teže i dugotrajnije
- Flamanville 3, Fra: izvorno: 2007-2012. zadnji plan: 2024
- Oikiluoto, Fin: plan: 2002-2009. Zadnji plan: 2022.
- Vogtle 3&4, USA. Izvorno 2009-2016. Zadnji plan 2022 i 2023.
- Ovim tempom u zapadnim zemljama i obična zamjena je upitna
- Svega 5, 6 reaktora u gradnji
- Tumačenja da su problemi vezni uz „izostanak ekonomije veličine”
- Situacija je bolja u Rusiji i Kini i još nekim zemljama
- U svijetu se početkom 2021 gradi 54 reaktora
- Prosječno vrijeme gradnje 84-117 mjeseci (1981-2019)
- Mobilno rješenje izgrađeno u tvornici izbjeglo bi većinu problema gradnje
- Jedna od varijanti je ThorConIsle, torijev reaktor hlađen rastaljenom soli



Primjer tehnologije: HSR

Kina: 2008-2021 0-37 900 km (70% svijeta) USA 1960-2021: 301 km



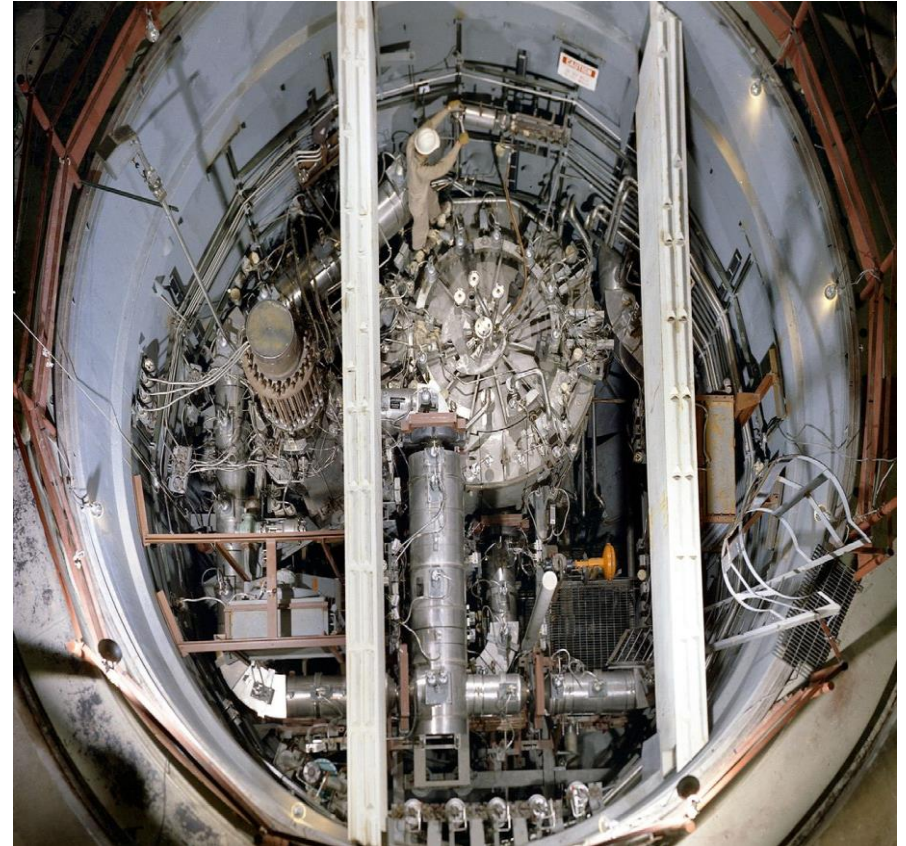
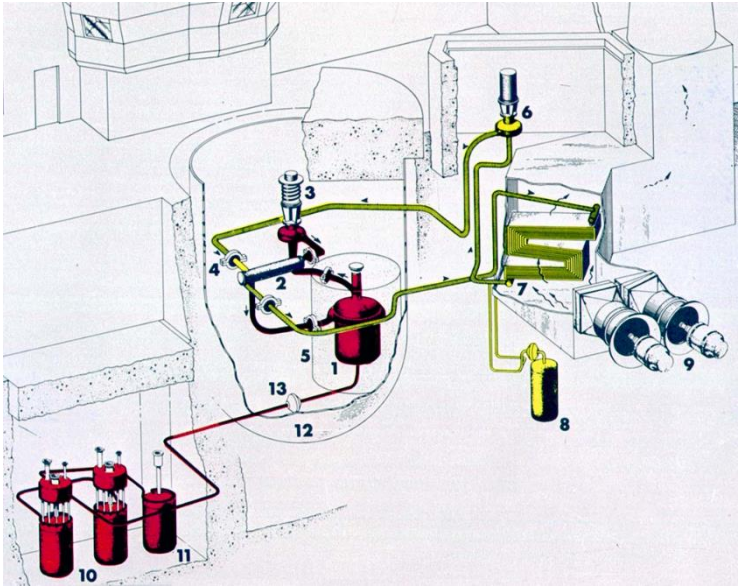
Da li je razlog izostanka HSR u USA, sa svim prednostima željeznice, cijena, tehnologija, NYMBY ili nešto treće? Zaštita avioindustrije?

Da nema Kine, da li bismo uopće znali da je moguće premostiti kontinente sa HSR?

ThorConIsle

- Povijesni temelj je napušteni koncept torijevog reaktora razvijan za potencijalnu upotrebu u avionima. Isti je bio „najveće dostignuće„ Alvina Weinberga, čovjeka koji je patentirao LWR.
- Reaktor je uspješno radio do 1969.g., Kennedy ukinuo program
- Razvojem ICMB prestala je potreba za avionima na nuklearni pogon.
- Povećana varijanta razmatra se danas za elektrifikaciju Indonezije
- Sam reaktor bio bi manji dio plutajuće termoelektrane koja bi imala kompletnu opremu, uključujući npr. rezervni transformator
- U koncept je uključen i nenuklearni dio, do energetske sabirnice tj. spoja na EES zemlje
- U slučaju povoljne nabavne cijene ovakve elektrane, samo bi kapaciteti proizvodnje i regulatorna usklađenost bili na putu masovne primjene
- Torijevog goriva ima više nego uranskog; pola svjetskog stanovništva je < 100km od mora;





15.

SAVJETOVANJE HRO CIGRE
HRO CIGRE SESSION
 ŠIBENIK, 7.-10. STUDENOGA 2021./NOVEMBER 7-10, 2021

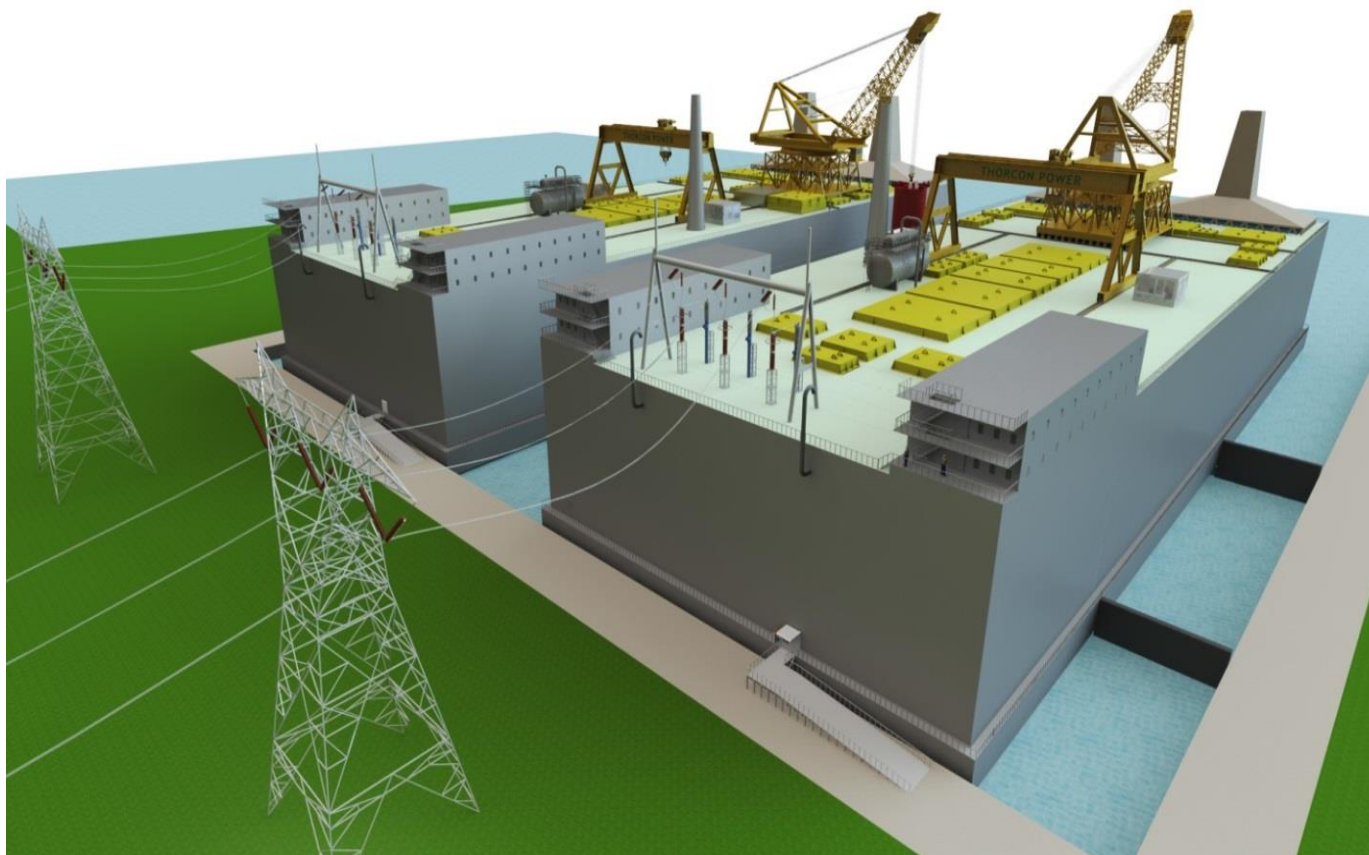


cigre
Hrvatska Croatia

100 GODINA MEĐUNARODNE CIGRE
30 GODINA HRO CIGRE
70 GODINA CIGRE U HRVATSKOJ

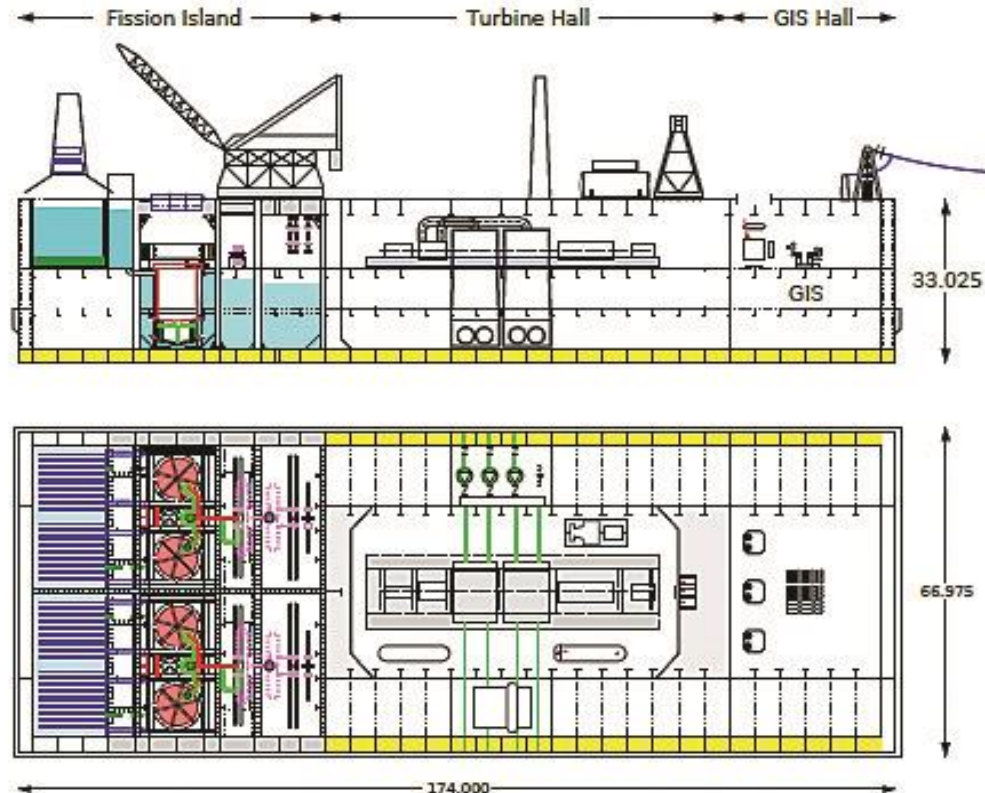
165 GODINA OD ROĐENJA NIKOLE TESLE
100 GODINA KONČARA
135 GODINA SIEMENSA
70 GODINA ČASOPISA ENERGIJA

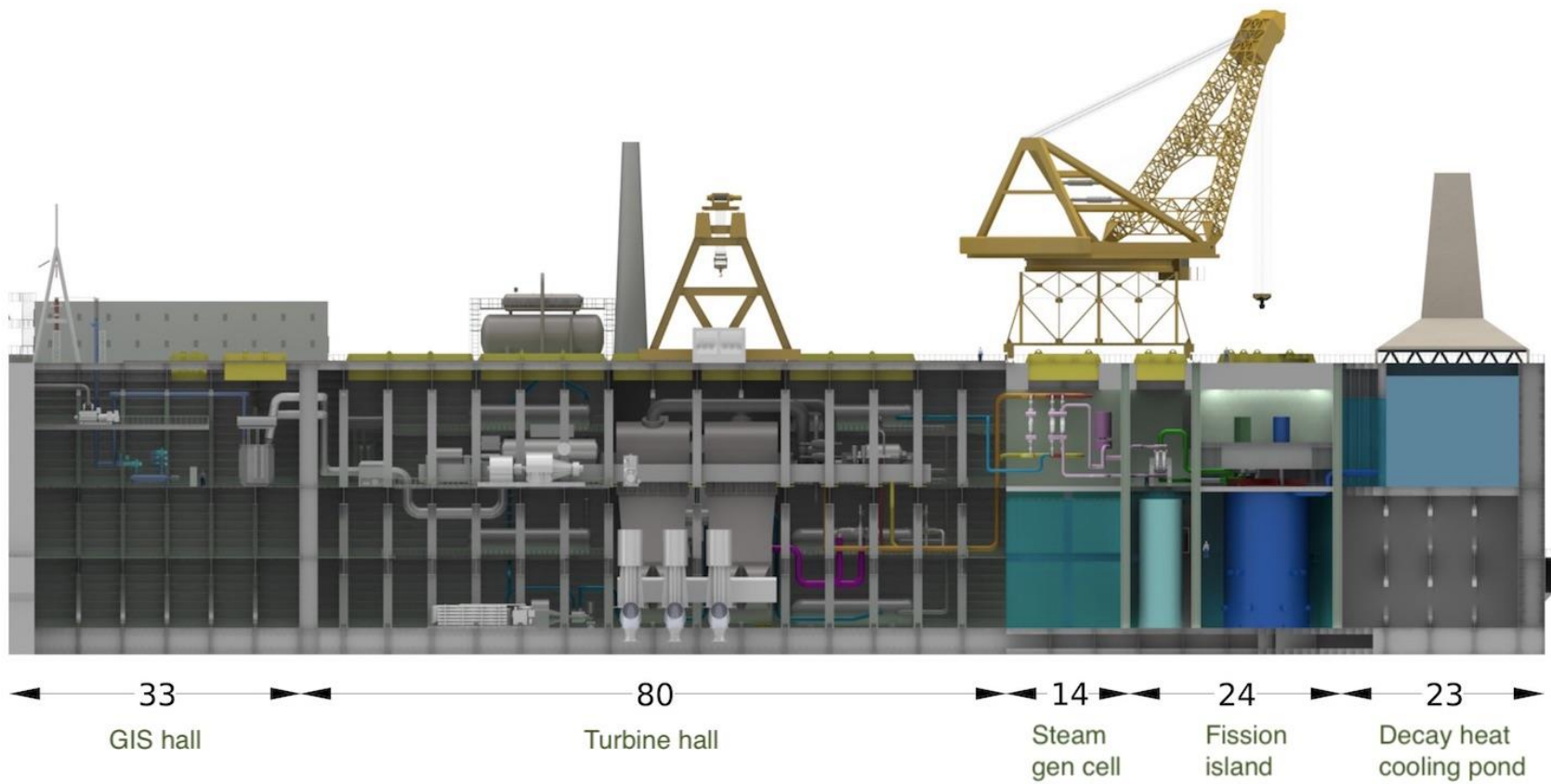
ThorConIsle

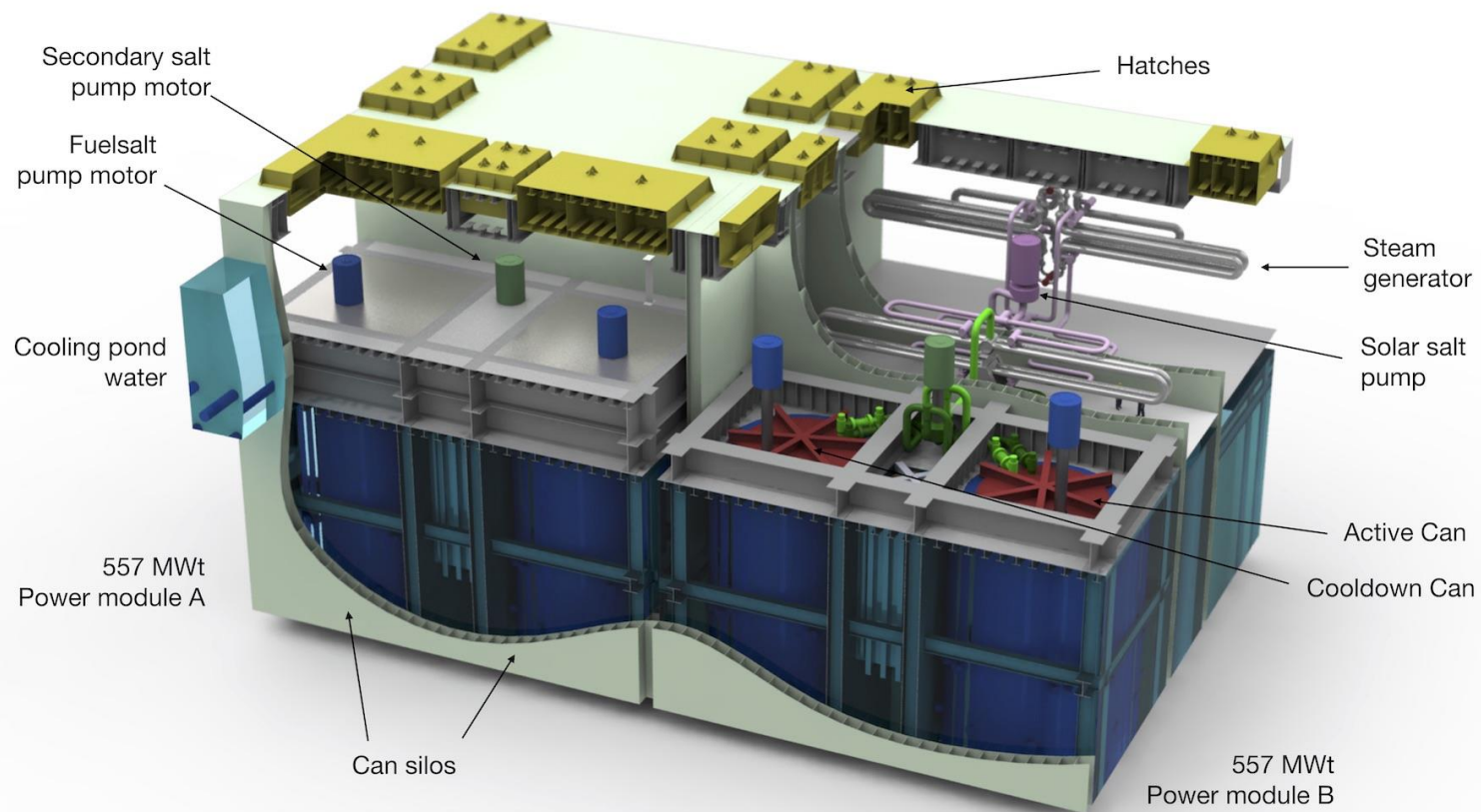


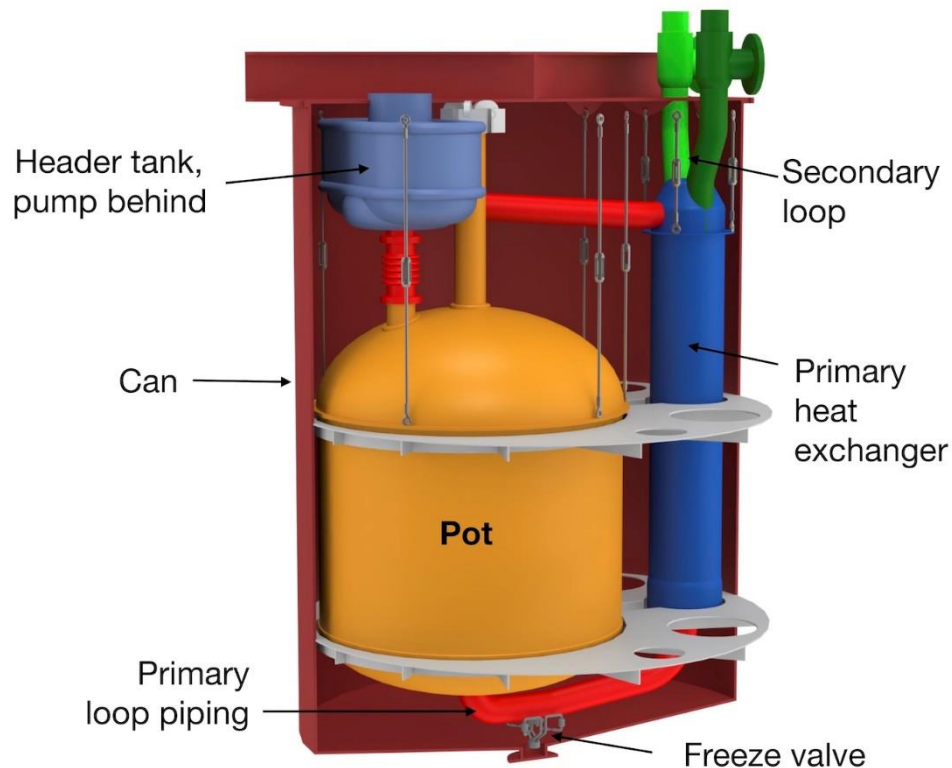
Prednosti ThorConIsle Designa

- „ThorConIsle” ne zahtjeva nove tehnologije. Koriste se komercijalno dostupni, masovno korišteni materijali. Najkonzervativniji koncept OakRidge
- Kao ne-nuklearni dio projekta – uobičajeni super-kritični parni ciklus

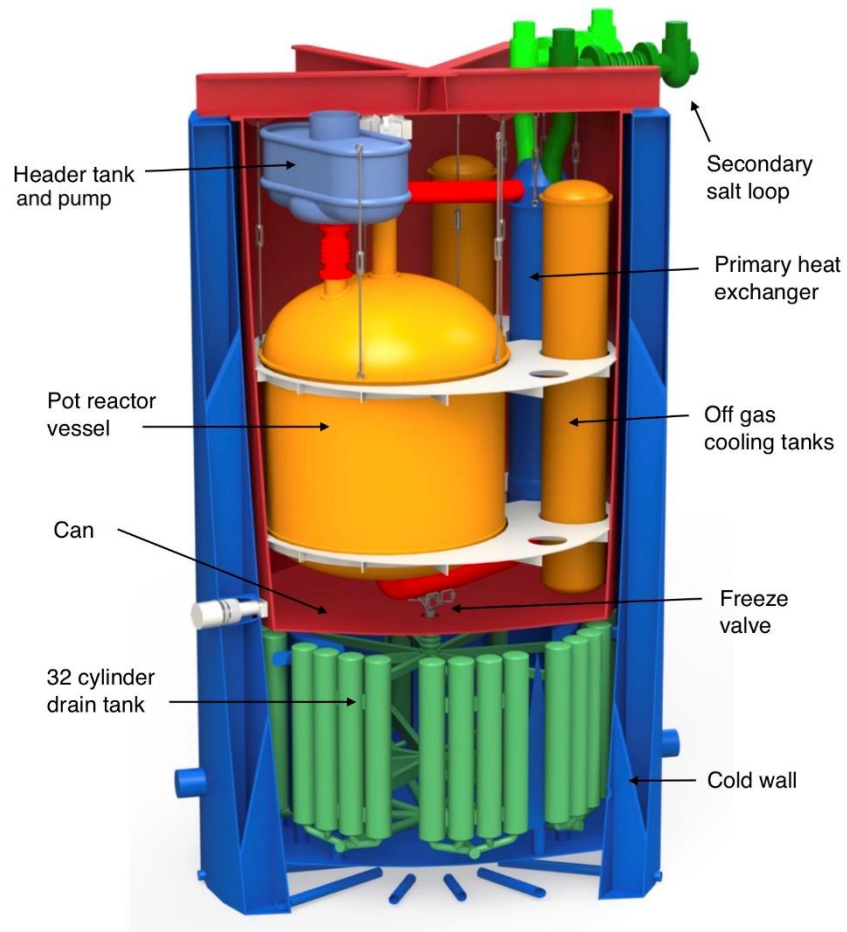








Can thermal output	557 MW
Can electrical output	258 MW
Plant efficiency	46.3%
NaF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄	fuelsalt
76/12/10.2/1.8	mol pct
Vapor Pressure@704C	≤3 Pa
Fuelsalt flow kg/s	2934
Pot inlet C	565
Pot outlet C	704
Loop transit time	11.6 sec
Pot outlet press	2.9 barg
Can diameter	7.775 m
Can height	10.250 m
Pot diameter	4.916 m
Pot height	5.590 m
Can weight(no salt)	343 tons
Fuelsalt weight	43 tons
Fast α_K :pcm/K	-2/-3
Slow α_K :pcm/K	-5/-7



Prednosti ThorConIsle Designa

- Uslijed visoke temeprature - Visoka iskoristivost – min 45%
- Zbog niskog tlaka – 3 umjesto 150 bara – materijali su daleko jednostavniji/jeftiniji. Ovo se odnosi na sva 4 kruga
- Zbog niskog tlaka – vrlo visoka intrinzična sigurnost
- ThorConIsle se sastoji od 2 modula po 250 MW. Svaki sa 2 zamjenljiva reaktora, unutar „silosa”, dimenzija 11,6 (h) x 7,3 (2r) od cca 400 tona
- Navedene jedinice imaju samo jedan pokretni dio – pumpu za sol
- Ispod reaktorske posude nalazi se „čep od soli” kojeg hladi helij. U slučaju povećanja temperature u primarnom krugu, ovaj čep se otapa. Time se sol odvodi u spremnik bez moderatora u kojem nije moguća kritičnost
- Proces hlađenja tog spremnika je pasivan, operateri nemaju ulogu, niti mogu zaustaviti, nije potrebno ni napajanje el.en. (Fukushima)
- Održavanje je olakšano izostankom posuda debelih stijenki u nuklearnom krugu te samim konceptom – kran, klapne...



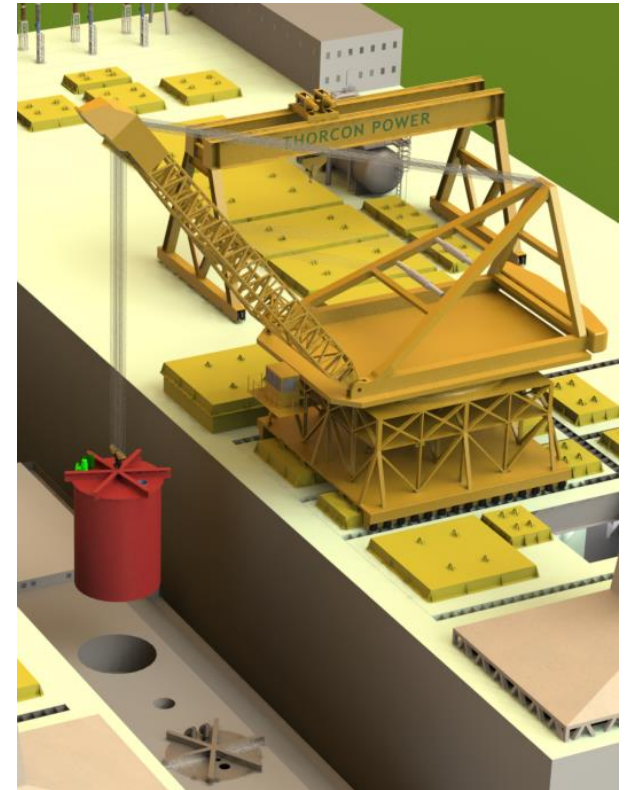
Nuklearna sigurnost

- Gorivo je u tekućoj formi. Uslijed zagrijavanja - pad kritičnosti zbog jake negativne povr. Veze. Ovo se i desilo na eksperimentu u Oak Ridgeu
- Gorivo je pod tlakom vrtnog crijeva. Svaki idući krug je pod većim tlakom. Razlika između radne (730oC) i temp. Isparavanja (1430oC) je velika. Promjena faze je nezamisliva (za razliku od LWR gdje je dovoljno puknuće)
- Betonski i čelični omotači štite od udara (npr. Boeing 777, potres, tsunami)
- Odabrana solarna sol u trećem krugu kemijski veže ključne radionuklide, odvajanje fisibilnih materijala je otežano
- Glavna sigurnost se postiže oslanjanjem na fizikalne principe. „Walk away safe”.
- Zračenje od kozmičkog zračenja je veće na palubi barže, nego od NE
- Najopasniji produkti fisije, uključujući jod-131, stroncij-90 te cezij-137 su vezani za sol te u slučaju bilo kakvog problema, završavaju u spremniku goriva



Zamjena goriva

- Design je takav da se svi vitalni dijelovi mijenjaju za vrijeme rutinskog održavanja turbina
- Svake 4 godine mijenja se cijeli primarni krug
Dolazi do degradacije grafita – moderatora, gorivo se pri tom prebaci u novi reaktor
- Gorivo se mijenja svakih 8 godina
- Iskorišteno gorivo se vozi u procesno postrojenje
- U Oak Ridge-u imaju iskustvo sa ovim procesom
- Svi osjetljivi procesi su na drugoj lokaciji



Cijena električne energije i mogućnost proizvodnje elektrana

- Design prilagođen proizvodnji u brodogradilištima
- Kapacitet svjetskih brodogradilišta 2010 bio je 53 mil tona
- Za proizvodnju 100 ThorConIsle objekata (50 GW/godinu) treba oko 10% svjetskih kapaciteta no samo 0,3% svjetskog čelika
- Uslijed niskog tlaka u krugovima, proizvodnja nije teška. Masovna proizvodnja će sniziti troškove.
- ThorCon izjavljuje da je ograničenje na proizvodnji kotlova i turbina
- Očekuje se cijena od 800-1000\$/kW
- Procjena cijene je 0,03\$/kW, za razliku od barem dvostruke cijene na ugljen
- Ovime je cijena niža i od cijene iz prirodnog plina, uslijed velikog rasta cijena CO₂, npr. U Europi



Utjecaj na emisije CO2

- Svaka „ugljenara” od 1000 MW troši oko 4 000 000 t ugljena (eta = 45%)
- Za eliminaciju 8 000 000t CO2, potrebna su 2 ThorConIsle objekta
- Uz pretpostavljene emisijske faktore, u tablici su prikazani potrebni novi ThorConIsle objekti za eliminaciju emisija CO2 iz fosilnih izvora

Izvor energije	Potrošnja (EJ)	Godišnja promjena (EJ)	Udio primarne energije (%)	Pretpostavljeni emisijski faktor (10 ⁶ /EJ)	Emisija CO2 (10 ⁹ t)	Broj ThorConIsle za zamjenu
Nafta	193,0	1,6	33,1	80	15,44	13 394
Plin	141,5	2,8	24,2	60	8,49	9 820
Ugljen	157,9	-0,9	27,0	90	14,21	10 958
Obnovljivi*	29,0	3,2	5,0	-	/	/
Hidro	37,6	0,3	6,4	-	/	/
Nuklearna	24,9	0,8	4,3	-	/	/
Suma	-	-	-	-	38,14	34 172

Po EJ, potrebno je oko 69 ThorConIsle objekata

Za potrebu prestanka samo proizvodnje el.en. iz ugljena i plina pomoću ThorConIsle treba oko 16 000 objekata

U razdoblju 2025-2050 trebalo bi tako proizvesti 640 objekata godišnje, uz rast potrošnje 1%, a za sve fosilne energente - duplo

To čini 320 GW novoinstaliranih kapaciteta/god uz trošak od 320 Mrd \$
Slobodan kapacitet svjetske brodogradnje 2002 bio je za 200 GW



Trenutni status ThorConIsle

- Sa početkom 2020.g. planiran je sljedeći gantogram razvoja ThorConIsle projekta:
- 7/2021 – završetak designa;
- 7/2022 - pre-fision postrojenje
- 7/2023 – testiranje pre-fision postrojenja
- 7/2025 - izgradnja demonstracijskog postrojenja
- 7/2027 – rad na mreži i završetak licenciranja
- Iznos do sad uložen je zanemariv. 50 000 000 \$. Usporedba sa programom Apollo (100 Mrd današnjih dolasra) ili gradnjom Liberty brodova u WW2, dokazuje da se može
- Na kocki je budućnost planete zemlje



Zadnje vijesti nakon slanja članka

- Prije 7 dana, Kina je objavila gradnju min 150 LWR reaktora, cca 440 Mrld \$
- Procjena je da je 1 kW 2500-3000 \$, 3x manje od Fra i USA (Bloomberg)
- Više kapaciteta nego u svijetu od 1980
- Smanjenje emisije CO₂, cca 1.5 Mrld t (U.K., Ger, Fra, Ita zajedno)
- Dodatno: Kina je u 8-mom mjesecu 2021 završila prototip Torijevog MSR
- Radi se o reaktoru od 2 MW, a ako eksperimenti budu uspješni slijedi reaktor od 373 MW, prije 2030
- To će biti prvi torijev MSR u radu od 1969-te



S obzirom na visoku izlaznu temperaturu ThorCon reaktora, postoji li mogućnost proizvodnje vodika i desanilizacije morske vode koristeći otpadnu toplinu reaktora?

- Prednost koncepta ThorConIsle je jednostavnost i unificiranost. Tehnički, možda je moguće ostvariti oboje. Podsjetnik, u Fukushima je eksplodirao vodik, koji je najeksplozivniji poznati plin. Rizici vezani uz vodik su iznimni
- Teoretski: „nuklearna energija može se koristiti kako bi se vodik proizveo elektrolizom, a u budućim viskotemperaturnim reaktorima vjerojatno i termokemijski”
- Većina rezultata pretraživanja vezano za termokemijski vodik su znanstveni članci, što govori o tome da tehnologija nije zrela
- Kompleksnost tehnologije bi zaustavila razvoj cijelog ovog projekta koji je praktički temeljen na jednostavnosti i sigurnosti (sve što vodik nije), dovoljno će teško biti dobiti odobrenje regulatora i u ovoj varijanti
- U prvoj iteraciji, iz tog razloga, trebalo bi koristiti metodu elektrolize za proizvodnju vodika
- Kasnije, ne bi trebalo biti problematično ostvariti npr. vrelovodno ili parno grijanje te desalinizaciju. Oboje naime ima ishodište u nenuklearnom dijelu postrojenja- oduzimanjem pare na parnoj turbini, primjer Haiyang NPP, istočnokineska Shandong provincija gdje se uvodi grijanje i desalinizacija u novom reaktoru
- Desalinizacija uključuje dvostupanjsku reverznu osmozu korištenjem topline iz procesa



Koji je kemijski sastav goriva, koristi li se samo torijsko gorivo ili je potreban i obogaćeni uranij? Koliko mora biti obogaćen uranij?

- Kemijski sastav goriva je NaF-BeF₂-ThF₄-UF₄. Reaktor zahtijeva 39 litara uranije godišnje, obogaćenog do 19,7%
- Za vrijeme izgaranja, stvaraju se fisibilni U233 i Pu239, no ne dovoljno da bi zamijenili izgorjelo gorivo. Stoga se dnevno dodaje gorivo.
- U sekundarnom krugu sol je NaF-BeF₂
- Ovaj koncept produljuje trajanje svjetskih rezervi uranija preko 2x odmah. Za sad nije palnirano dodavanje „thorium blanket”



Koliko bi ThorCon reaktor trebao generirati visokoradioaktivnog otpada te postoji li neko inovativno rješenje za zbrinjavanje istog?

- Odgovor potencijalnim korisnicima i nije bitan. Kompletan kontejner se otprema proizvođaču, nakon 4g. „ležanja” na site-u, a doprema se novi. Gorivo također. Time je NIMBY sindrome značajno preveniran. Na barži ne postoji kapacitet za zbrinjavanje goriva.
- Na 250 MW modulu, potroši se 112 kg fisibilnog urana (neto), godišnje
- Samo gorivo se uklanja sa sitea nakon 8g. U posebnom spremniku ono se hladi dok se produkti fisije raspadaju. Na 0,25% preostale snage spremni su za transport
- Inovativnost rješenja je upravo u tome da se problem fizički miče sa lokacije i prebacuje na lokaciju postrojenja za obradu, koje bi servisiralo 50 ThorConIsle-a.
- U usporedbi sa LWR, ThorCon's neto potrošnja fisibilnog urana je ispod 50 usljed više termičke efikasnosti, uklanjanja Xe-135 te proizvodnje U-233 iz torija



- Krešimir Komljenović
 - HEP Proizvodnja d.o.o.
 - Kresimir.komljenovic@hep.hr
-
- Senka Ritz
 - HEP d.d.
 - Senka.Ritz@hep.hr

