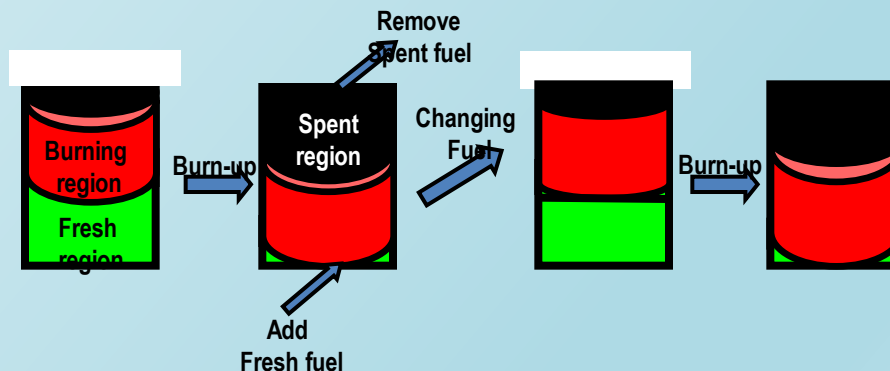
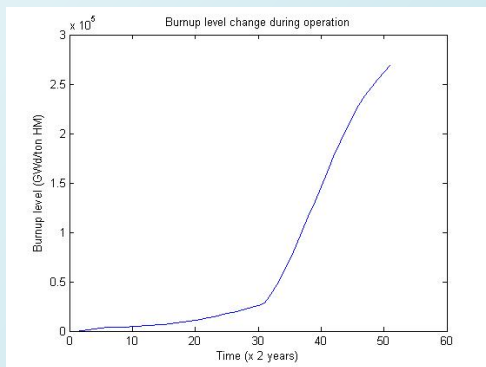
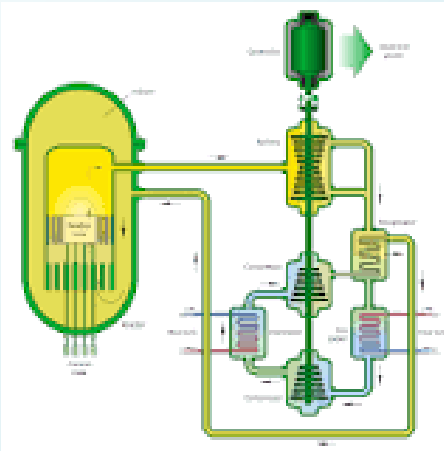


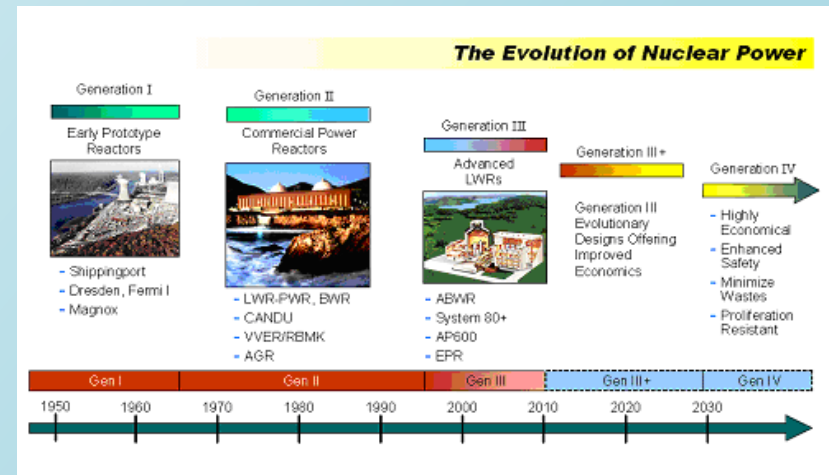
SISTEM ENERGI NUKLIR GENERASI LANJUT

Prof. Dr. Zaki Su'ud
Nuclear and Biophysics
Research Division
ITB



Daftar Isi Presentasi

1. Pendahuluan
2. PLTN Generasi Lanjut
3. Sistem Energi Fusi
4. Accelerator Driven System(ADS)
5. Penutup



PENDAHULUAN: ISU PERUBAHAN IKLIM



- Banjir bandang
- Kebakaran hutan masif
- Gelombang panas
- Angin topan
- Kekeringan
- Peningkatan level laut



- ➔ Perlu perubahan kebijakan secara radikal
- ➔ Produksi gas rumah kaca harus ditekan
- ➔ Energi nuklir generasi lanjut dapat berperan

DINAMIKA PROSPEK PLTN

- Kecelakaan nuklir Fukushima membuat prospek PLTN di titik nadir
- Tetapi 5-10 tahun kemudian ketika masalah pemanasan global menguat PLTN menjadi salah satu alternatif penting
- Masalah geopolitik 3 tahun terakhir semakin memperkuat pentingnya memasukkan PLTN pada komposisi energi
- Umumnya PLTN akan padam kalau ada gempa besar, tapi ini memicu “station black out”(SBO)
- Untuk PLTN di Jepang benteng pertahanan : jaringan listrik, genset dan baterai
- Untuk Indonesia : genset, baterai, keselamatan inheren/pasif

Keselamatan inheren pada PLTN

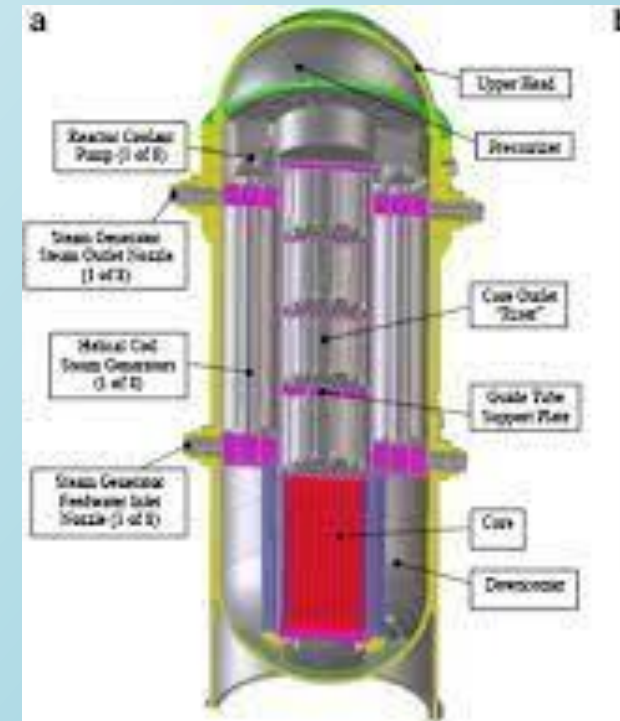
- Benteng terakhir untuk mencegah kecelakaan fatal hanya mengandalkan hukum alam, tak memerlukan komponen aktif atau tindakan operator untuk mengaktifkannya
- Misal untuk mengambil panas sisa (decay heat) seperti pada kasus Fukushima maka digunakan sirkulasi alamiah baik untuk pendingin biasa ataupun udara di sekitar sehingga tak tergantung keberadaan listrik
- Efek Doppler pada reaksi inti dapat dan sejenisnya dapat digunakan untuk mencegah terjadinya kecelakaan seperti Chernobyl



Optimalkan angin dengan sirkulasi alamiah

APAKAH PLTN MODULAR DAPAT MEMBERI PROSPEK BARU PLTN KE DEPAN?

- Produksi massal di pabrik
- Konsep modular memungkinkan kombinasi beberapa modul menghasilkan daya sampai orde GWe
- Mereduksi waktu konstruksi
- Uji keselamatan inheren skala penuh di pabrik
- Harga yang lebih kompetitif

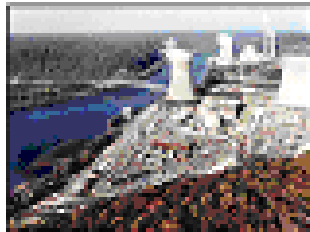


Evolusi Teknologi PLTN

The Evolution of Nuclear Power

Generation I

Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK
- AGR

Generation III

Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Generation III+

Generation III
Evolutionary
Designs Offering
Improved
Economics

Generation IV

- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimize Wastes
- Proliferation Resistant

Gen I

Gen II

Gen III

Gen III+

Gen IV

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

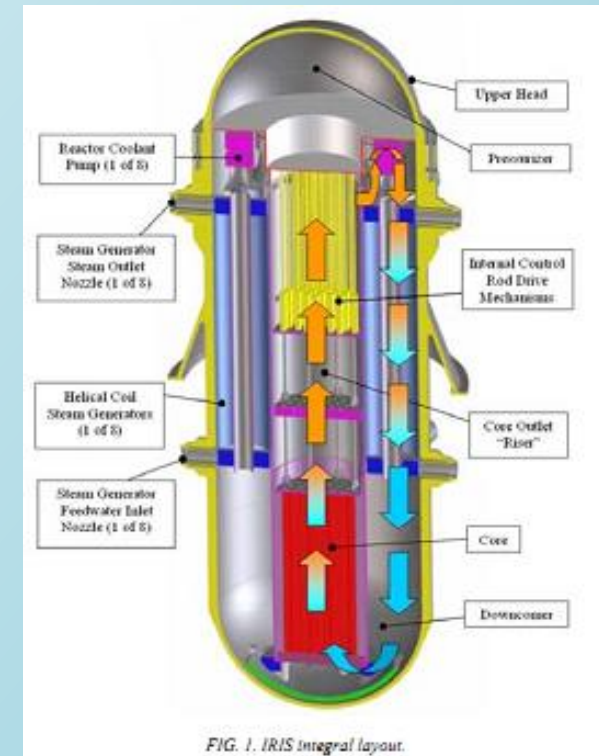
2020

2030

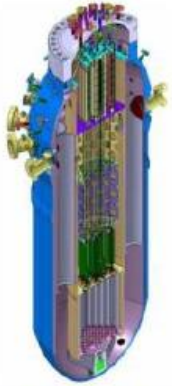
PLTN GENERASI III+

PLTN Generasi III/III+ Berpendingin air

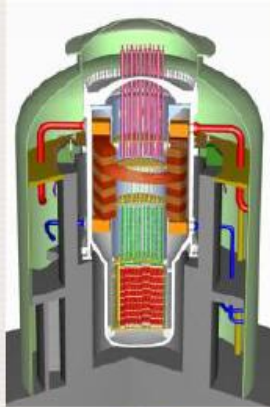
- **Mencegah kekurangan pendingin** dengan menyediakan stock pendingin dalam jumlah sangat besar serta menggunakan mekanisme alamiah pasif dalam proses switching
- Penambahan boron untuk memungkinkan **pasif shutdown** yang berbasis hukum-hukum dasar fluida
- Pengembangan konsep PLTN **moduler tipe integral** dengan pembangkit uap (SG) berada di dalam pressure vessel. Dengan demikian pipa-pipa besar dengan pressure tinggi yang rawan memicu LOCA besar dapat dihindari (Contoh pada IRIS)
- **Sistem sirkulasi alamiah** untuk membuang decay heat maupun untuk menggantikan peran pompa utama (terutama di reaktor kecil moduler)
- Sistem **kontrol reaktivitas pasif** untuk menghindari kecelakaan seperti Chernobyl



Light water-cooled SMRs



CAREM-25
Argentina



IMR
Japan



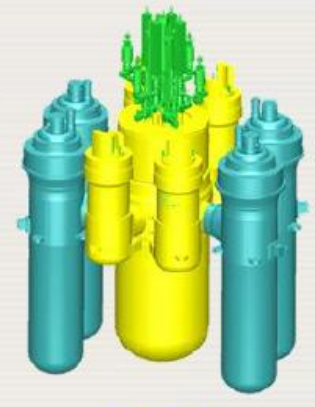
SMART
Korea, Republic of



VBER-300
Russia



WWER-300
Russia



KLT-40s
Russia



mPower
USA



NuScale
USA



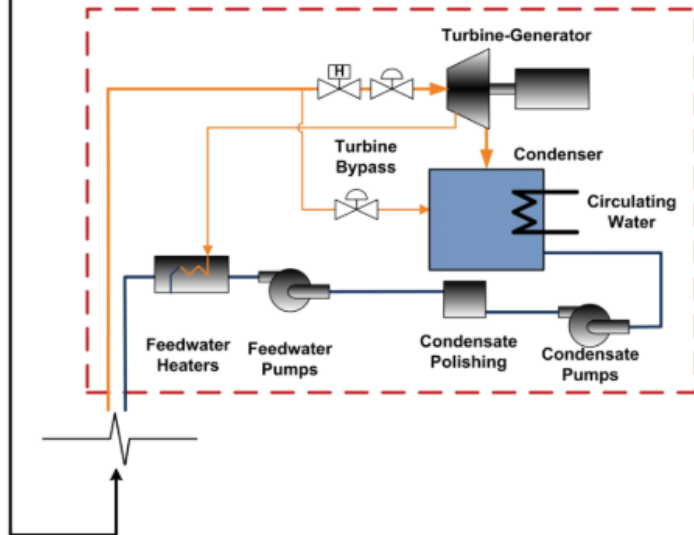
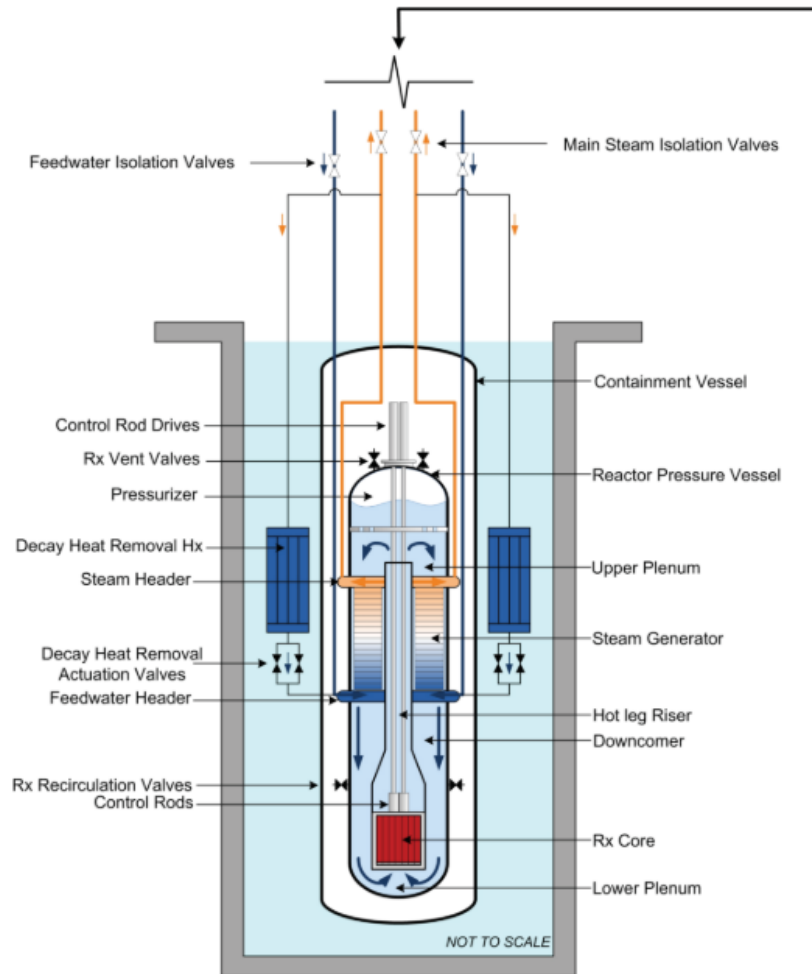
**Westinghouse
SMR - USA**



CNP-300
China, People Republic of



ABV-6
Russia



PLTN GENERASI IV

PLTN GENERASI IV

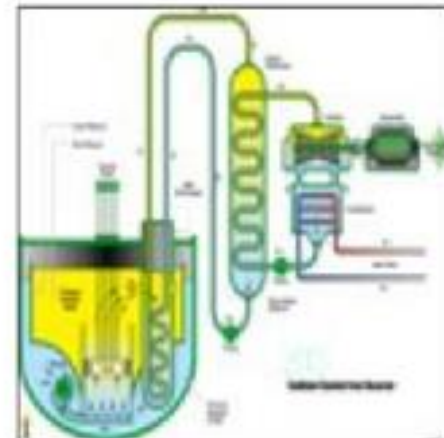
VHTR



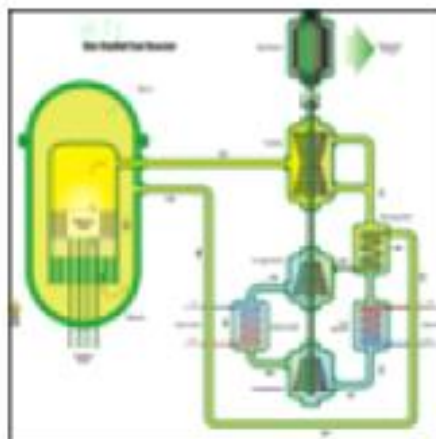
MSR



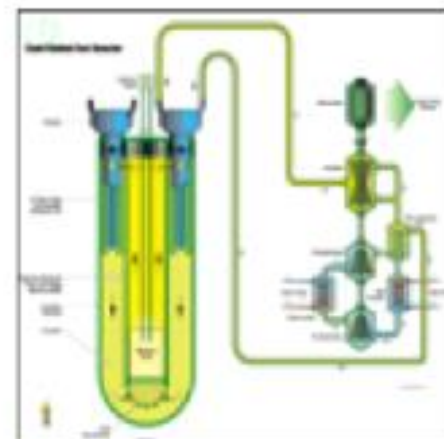
SFR



SCWR



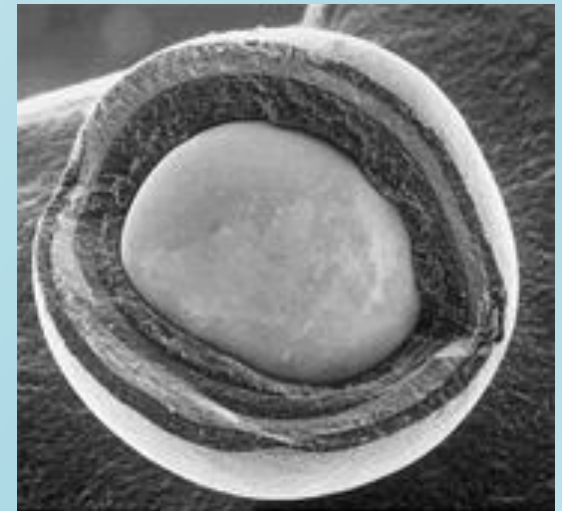
GFR



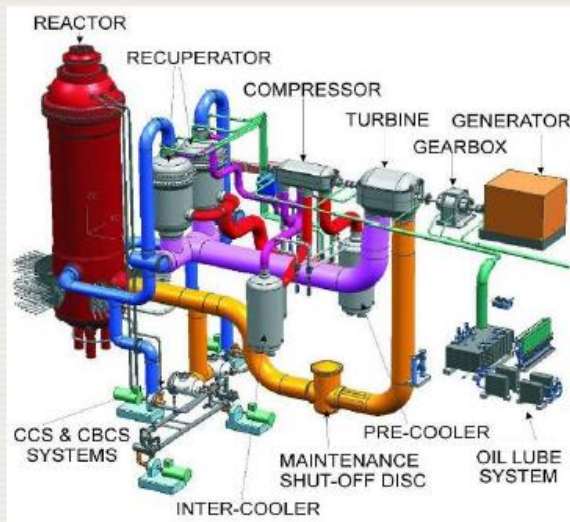
LFR

VERY HIGH TEMPERATURE REACTOR (VHTR)

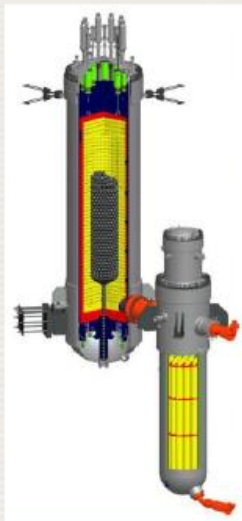
- Sistem moduler yang memiliki kemampuan inherent safety dengan mengandalkan reaktivitas Dopler yang sangat negatif untuk proses pemadaman reaktor secara pasif dalam keadaan kecelakaan
- Bahan bakar di kemas dalam partikel-partikel kecil ang dibungkus sejumlah lapisan khusus yang dapat menahan terlepasnya bahan radioaktif ke lingkungan saat terjadi kecelakaan parah
- Merancang sistem agar dapat membuang panas dengan radiasi ke pinggir saat terjadi kecelakaan hipotetis pecahnya sistem pendingin
- Mampu menahan bahan radioaktif untuk tidak keluar bahan bakar sampai suhu 2000°C.
- Memiliki kemampuan bertahan terhadap berbagai kecelakaan parah secara mandiri (inheren) tanpa perlu bantuan dari operator ataupun peralatan elektronik



Gas-cooled SMRs



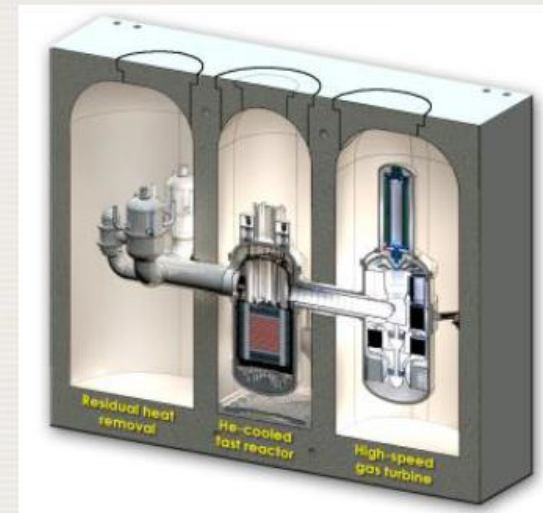
PBMR
South Africa



HTR-PM
China



GT-MHR
USA

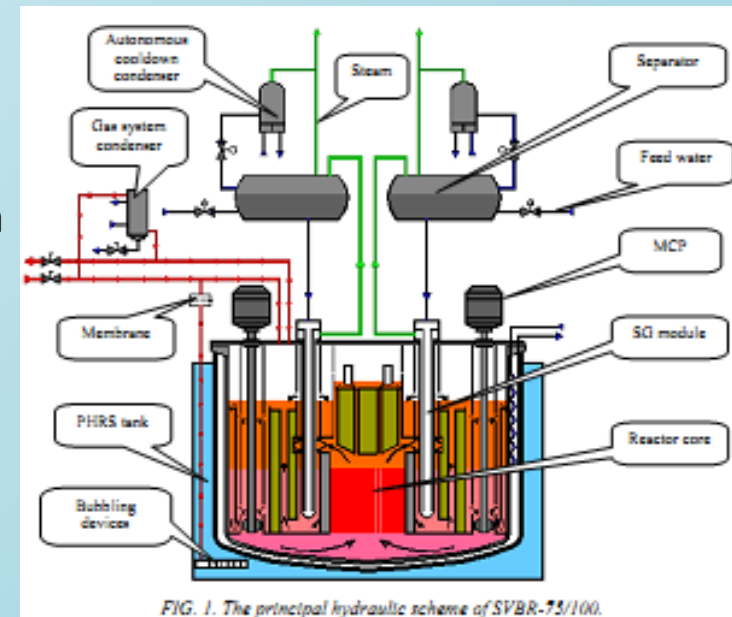
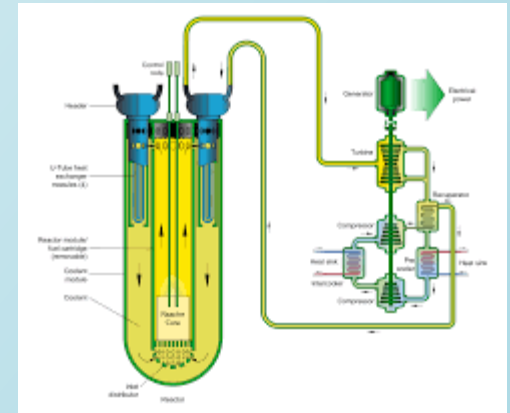


EM²
USA

100 Mwe per modul
2 unit sudah beroperasi
CINA

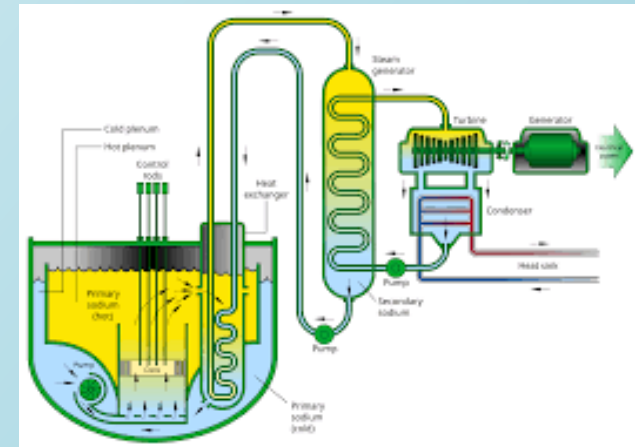
PLTN Berpendingin Pb/Pb-Bi cair

- Mengembangkan kemampuan inherent safety dengan memanfaatkan mekanisme feedback Doppler, Fuel Axial Expansion, Core Radial Expansion, dan Coolant Density Effect
- Menggunakan kemampuan sirkulasi alamiah yang tinggi untuk membuang panas secara pasif saat terjadi kecelakaan termasuk untuk membuang decay heat
- Mengembangkan sistem pembuangan panas berbasis sirkulasi alamiah udara di luar pressure vessel (RVACS-pendingin alternatif tanpa perlu pompa)
- Mengembangkan konsep “Zero burnup reactivity swing” untuk mengeleminir kemungkinan kecelakaan super prompt seperti di Chernobyl
- Menggunakan bakar bakar lanjut jenis nitrida, margin keselamatan lebih tinggi
- Margin temperatur sampai ke titik didih sangat besar
- Bisa bertahan terhadap berbagai kecelakaan parah secara mandiri dengan menggunakan mekanisme umpan balik temperatur



PLTN Berpendingin Sodium cair

- Keselamatan inheren berbasis balikan reaktivitas
- Sirkulasi alamiah untuk membuang panas sisa
- Sistem pembuangan panas berbasis sirkulasi alamiah udara di luar pressure vessel (RVACS-pendingin alternatif tanpa perlu pompa)
- “Zero burnup reactivity swing” untuk mengeleminir kemungkinan kecelakaan super prompt seperti di Chernobyl
- Margin temperatur sampai ke titik didih tidak terlalu tinggi
- Sodium dapat bereaksi dengan air dan udara menghasilkan ledakan → IHX
- Diantara Gen IV relative paling banyak dikembangkan dan paling lama → paling siap komersialisasi





BN600 (600 Mwe), Rusia, Beroperasi



BN800 (800 Mwe), Rusia, Beroperasi



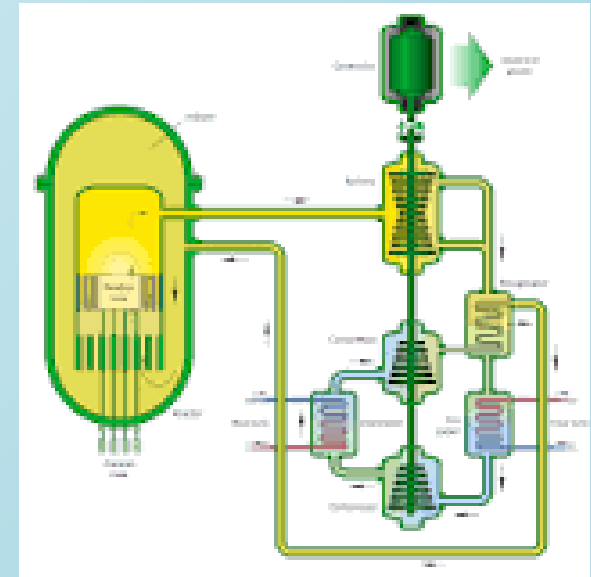
CN600 (600 Mwe), Cina, Beroperasi



Terra Power (345 Mwe), USA, sedang dibangun

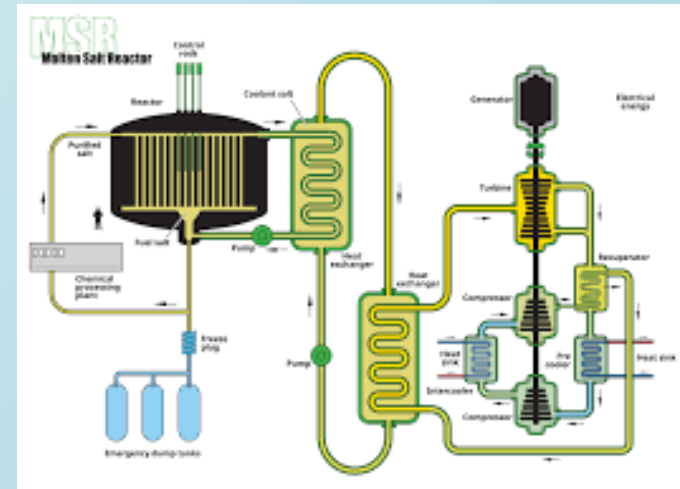
PLTN Berpendingin Gas He berspektrum netron cepat (GFR)

- Keselamatan inheren/pasif berbasis feedback
- Pembuangan panas sisa berbasis radiasi ke sekitar teras
- Zero burnup reactivity swing
- Pendingin gas helium, dapat dioperasikan sampai suhu tinggi
- Proyek Allegro di Eropa untuk demonstrasi teknologi GFR



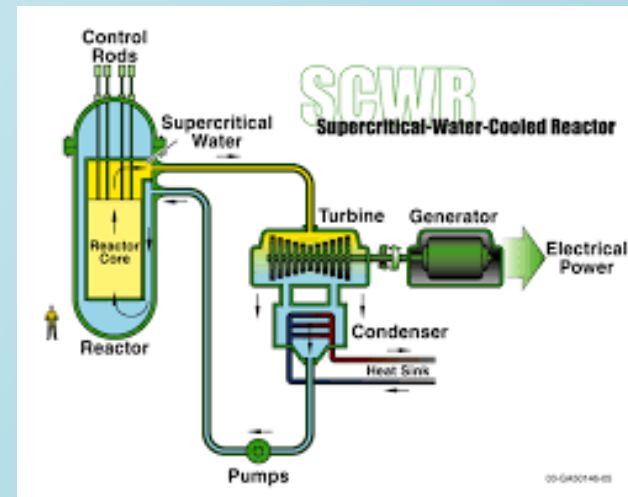
MOLTEN SALT REACTOR(MSR)

- Bahan bakar cair berbasis molten salt, dan juga pendingin berbasis molten salt yang dapat dioperasikan pada suhu tinggi
- Inherent safety dengan memanfaatkan mekanisme feedback
- Ada sistem untuk mengalirkan bahan bakar secara pasif ke tanki penampungan pada kondisi kecelakaan
- Memungkinkan penerapan siklus bahan bakar tertutup, missal untuk meminimalisir limbah
- Sejumlah reactor eksperimental beroperasi/dibangun di banyak negara: Cina, Eropa, USA, dll.



SUPER CRITICAL WATER COOLED REACTOR(SCWR)

- PLTN dengan pendingin air yang bekerja pada modus super kritis sehingga tak memerlukan steam generator
- Tekanan sistem pendingin sangat tinggi sekitar 25 Mpa sehingga dapat dioperasikan sampai temperature keluaran pendingin 500°C
- Efisiensi konversi energi bisa mencapai 44-48% (PWR sekitar 33%)
- Spektrum netron dapat bersifat thermal, cepat, maupun gabungan
- Satu-satunya PLTN berpendingin air yang masuk generasi IV



PLTN Generasi III+ dan IV yang dikembangkan di ITB

Pengembangan reaktor daya nuklir berumur panjang berpendingin Pb-Bi cair dengan bahan bakar nitrida yang memiliki kemampuan keselamatan inheren di ITB

Sumber:

Zaki S. and H. Sekimoto, Annals of Nuclear Energy (1995)

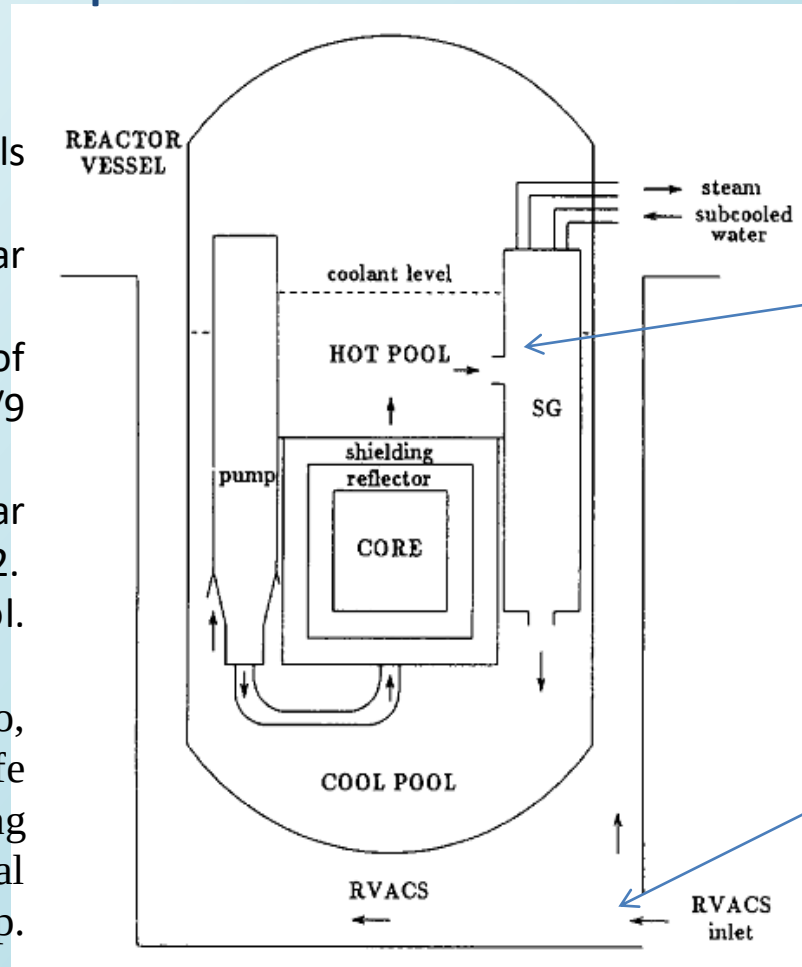
H. Sekimoto and Zaki S., Nuclear Technology, Vol. 105, no.3 (1995)

Zaki S. and H. Sekimoto: Journal of Nuclear Science and Technology, 32/9 (1995).

Zaki S and H. Sekimoto: Nuclear Eng. And Design 162(1996), p. 205-222.

Zaki S, Progress of Nuclear Energy, Vol. 50 (2008), p. 157-162

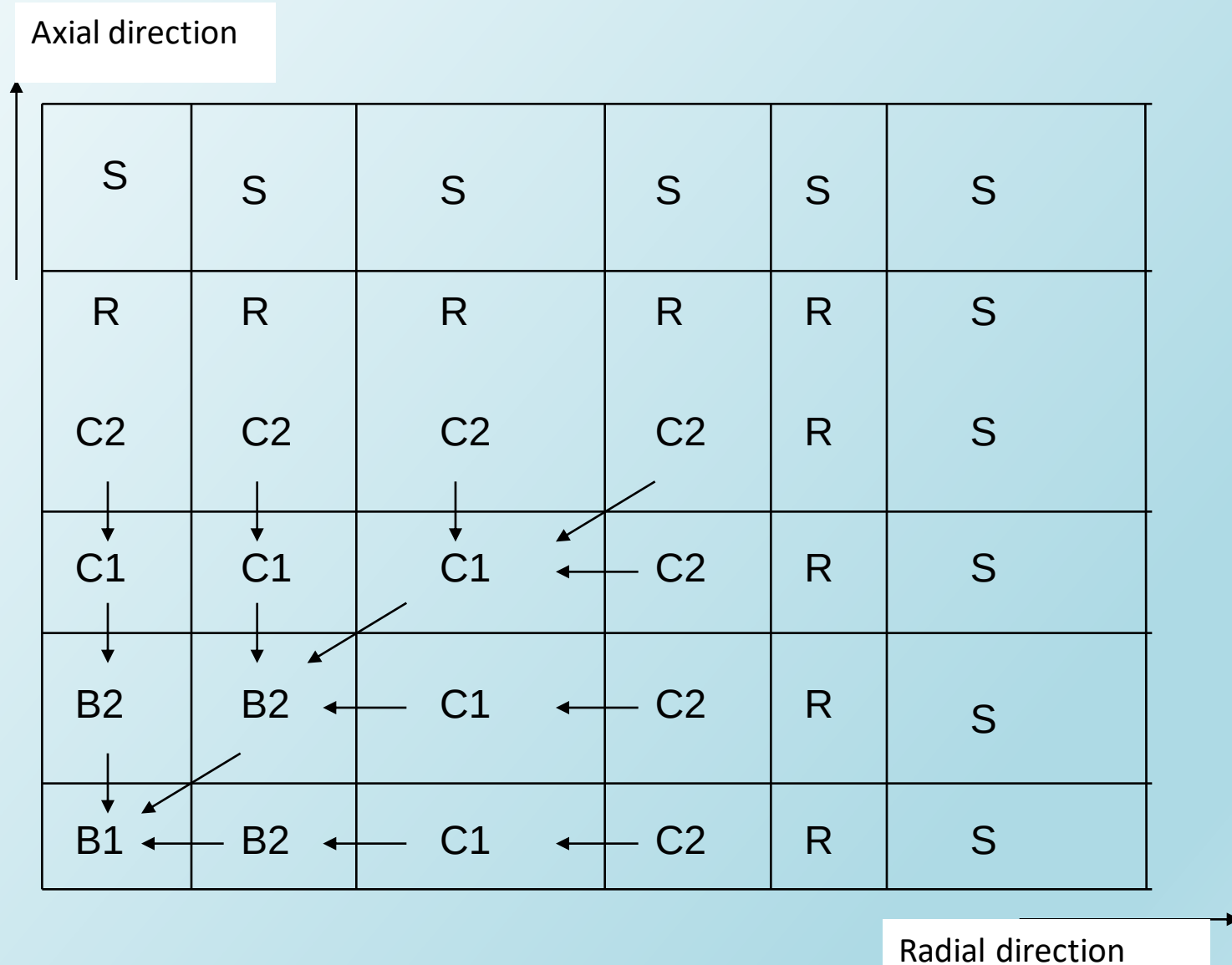
Raflis, H., Su'ud, Z., Waris, A., Irwanto, D., Core design selection for a long-life modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code, (2022) International Journal of Energy Research, 46 (7), pp. 9389-9403.



Teras terintegrasi: Teras, pembangkit uap berada di dalam bejana reaktor

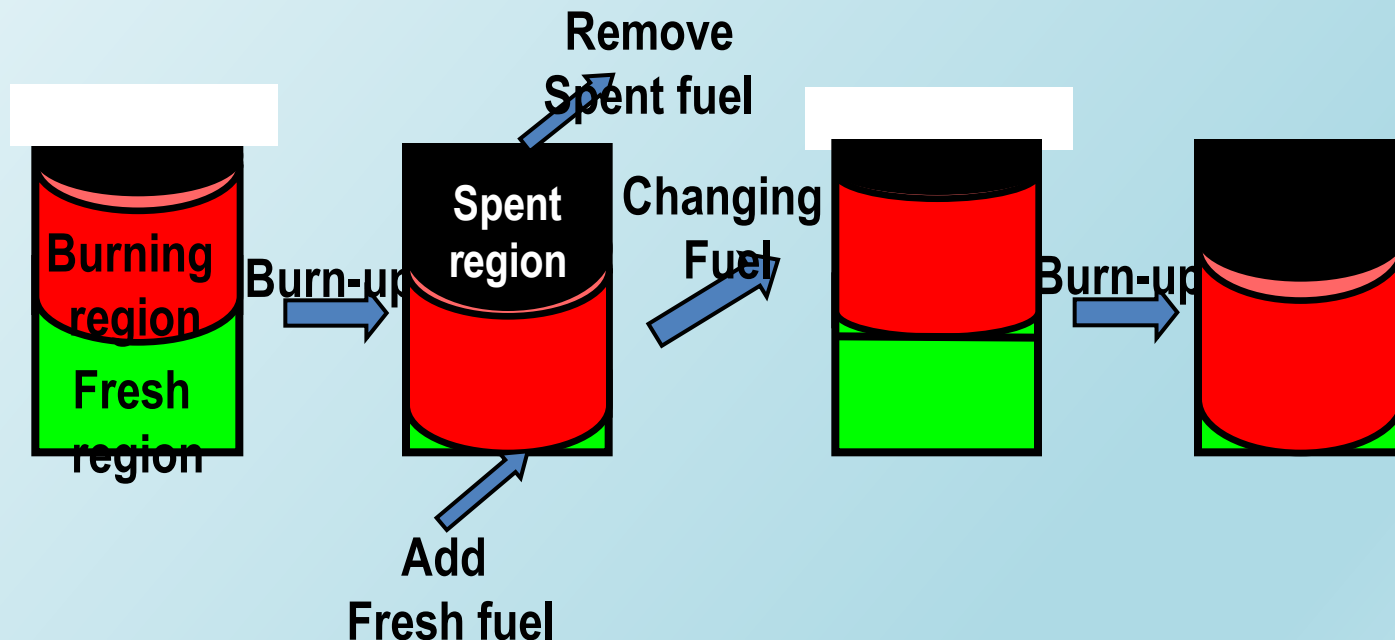
Pembuangan panas sisa secara pasif dengan aliran udara

Sejalan dengan bertambahnya waktu operasi bagian paling aktif di teras bergeser ke arah tengah

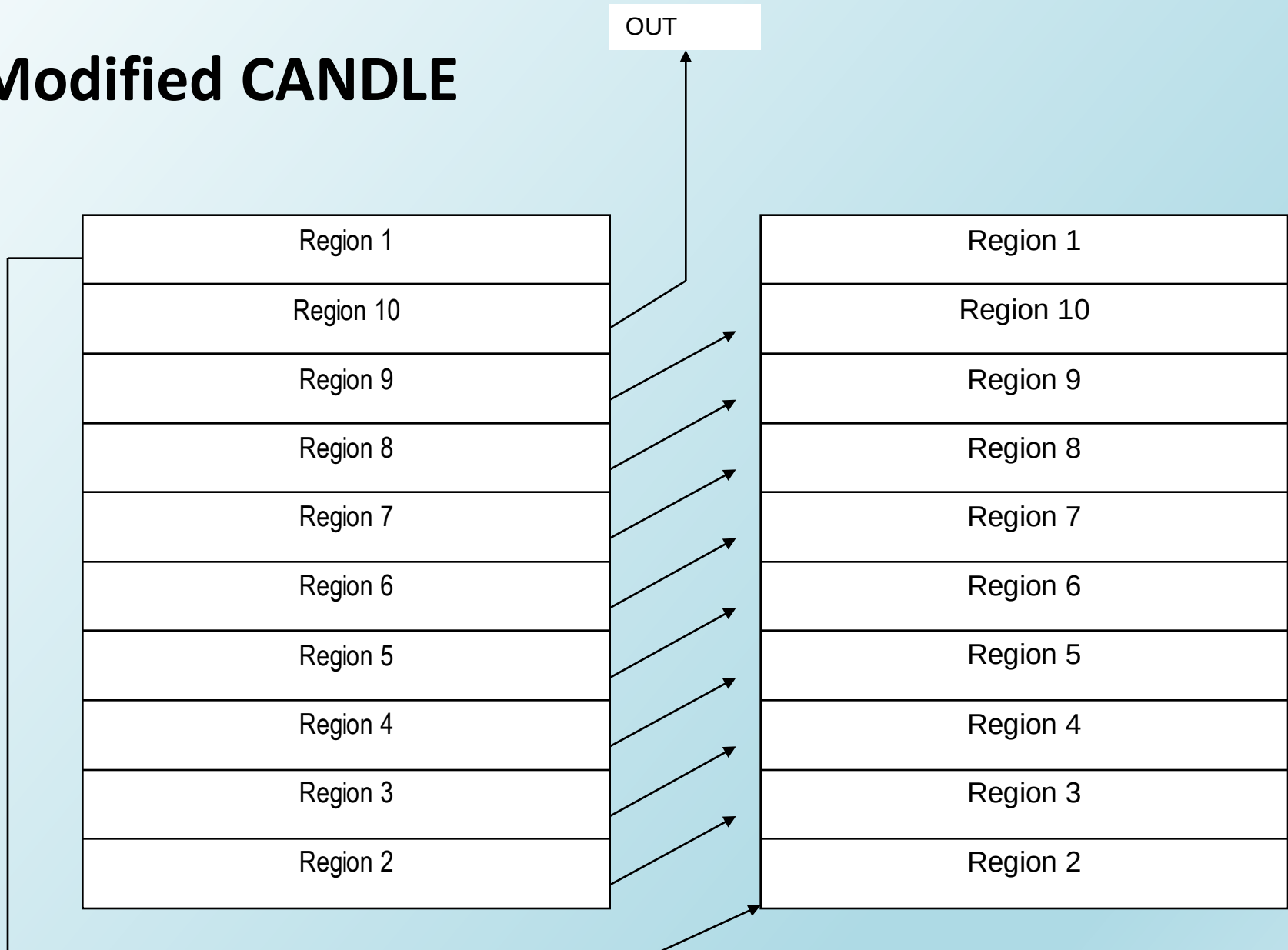


Modified CANDLE Reactor (ITB)

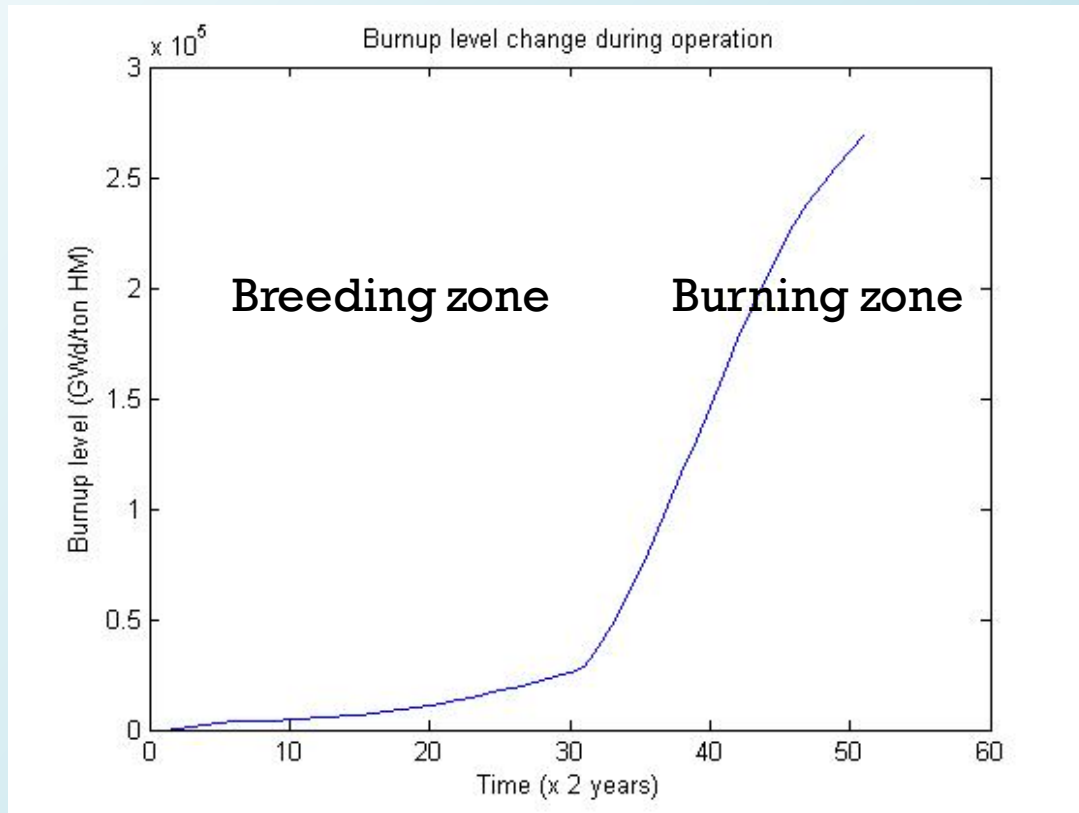
- PLTN yang dapat menggunakan uranium alam sebagai input siklus bahan bakar dengan konsep breed-burn → tak perlu lagi proses pengayaan Uranium
- Berikut konsep CANDLE yang diusulkan Prof. Sekimoto (Tokyo Tech, Jepang)



Modified CANDLE



Atomic density change of Pu-239 (for 600 MWt Power)



1. Widiawati et al. Annals of Nuclear Energy, 2025, Vol. 217, 111328
2. Ndayiragije et al. , Kerntechnik, 2024, vol. 89 no 5, p. 595-605
3. Afifah et al., Nuclear Engineering and Design, 2024, Vol 425, 113340
4. Widiawati et al. , Annals of Nuclear energy, 2022, vol 171, 109003
5. Widiawati et al., Int Journal of Energy Research, 2021, vl 45, no. 8, p. 12317

HASIL-HASIL LAIN DARI RISET DI ITB

- Long life PWR/PWR
- PLTN mikro
- Optimasi desain blanket Reaktor Fusi ITER
- Long life GCFR
- Thorium Based PWR/BWR/GCFR
- Long life Lead/Lead Bismuth cooled reactor
- Mekanisme Minimalisasi korosi Pb-Bi
- Program analisis 3 dimensi untuk netronik dan thermal untuk PWR/BWR/LMFBR
- Program analisis keselamatan PLTN

REAKTOR FUSI NUKLIR

1. Dengan inertial fusion : menggunakan laser/akselerator untuk memberikan energy awal pereaksi
2. Dengan reactor fusi nuklir termal: menggunakan reactor fusi suhu sangat tinggi (diatas 100 juta derajat)
3. Reaktor hibrida fisi -fusi

Inertial confinement fusion (ICF)



- bahan bakar fusi dalam bentuk target (biasanya berupa pellet berisi deuterium dan tritium) → dipanaskan dengan sinar laser → fusi
- Berkembang pesat di tahun 1970 an dan 1980 an
- Awalnya diperkirakan merupakan mekanisme yang praktis untuk memanen energy fusi misal untuk menghasilkan listrik, namun banyak kendala

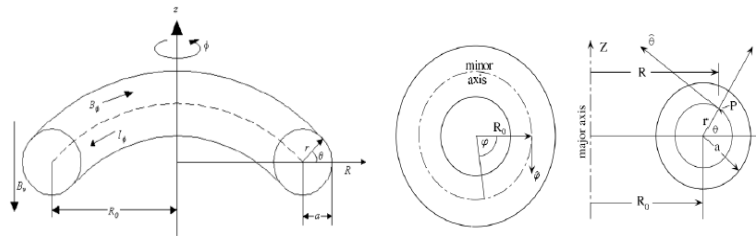
Progress terakhir : Pencapaian Break event energy oleh eksperimen di USA

On December 5, 2022, researchers at the [National Ignition Facility \(NIF\) of the Lawrence Livermore National Laboratory](#) in California (USA) announced that they had obtained net energy production from fusion nuclear power for the first time in history. The experiment underway at NIF using an inertial confinement fusion scheme with indirect laser irradiation produced 3.15 MJ of fusion energy compared to 2.05 MJ of energy input to the plasma, with a gain of approximately 154% (INERTIAL FUSION)

Magnetic confinement fusion

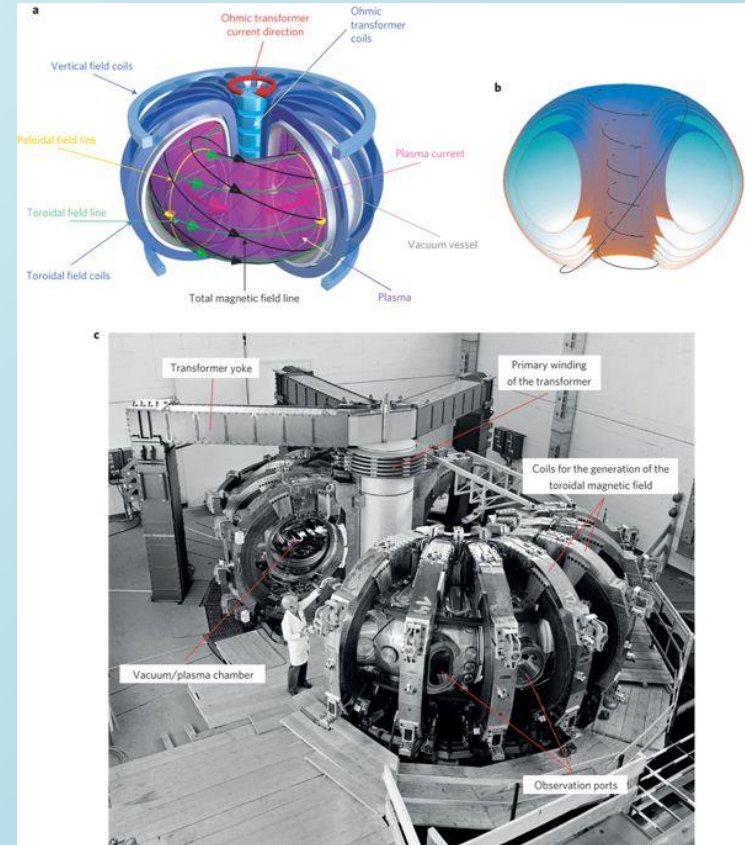
- Menggunakan medan magnet untuk mengungkung medan plasma suhu sangat tinggi (diatas 100 juta K)
- Contoh yang banyak digunakan adalah tipe TOKAMAK dengan reactor berbentuk toroidal
- Alternatif model adalah **stellarator configuration**

- Konfigurasi Tokamak merupakan reaktor yang berbentuk ruang toroidal vakuum (berbentuk seperti donat).

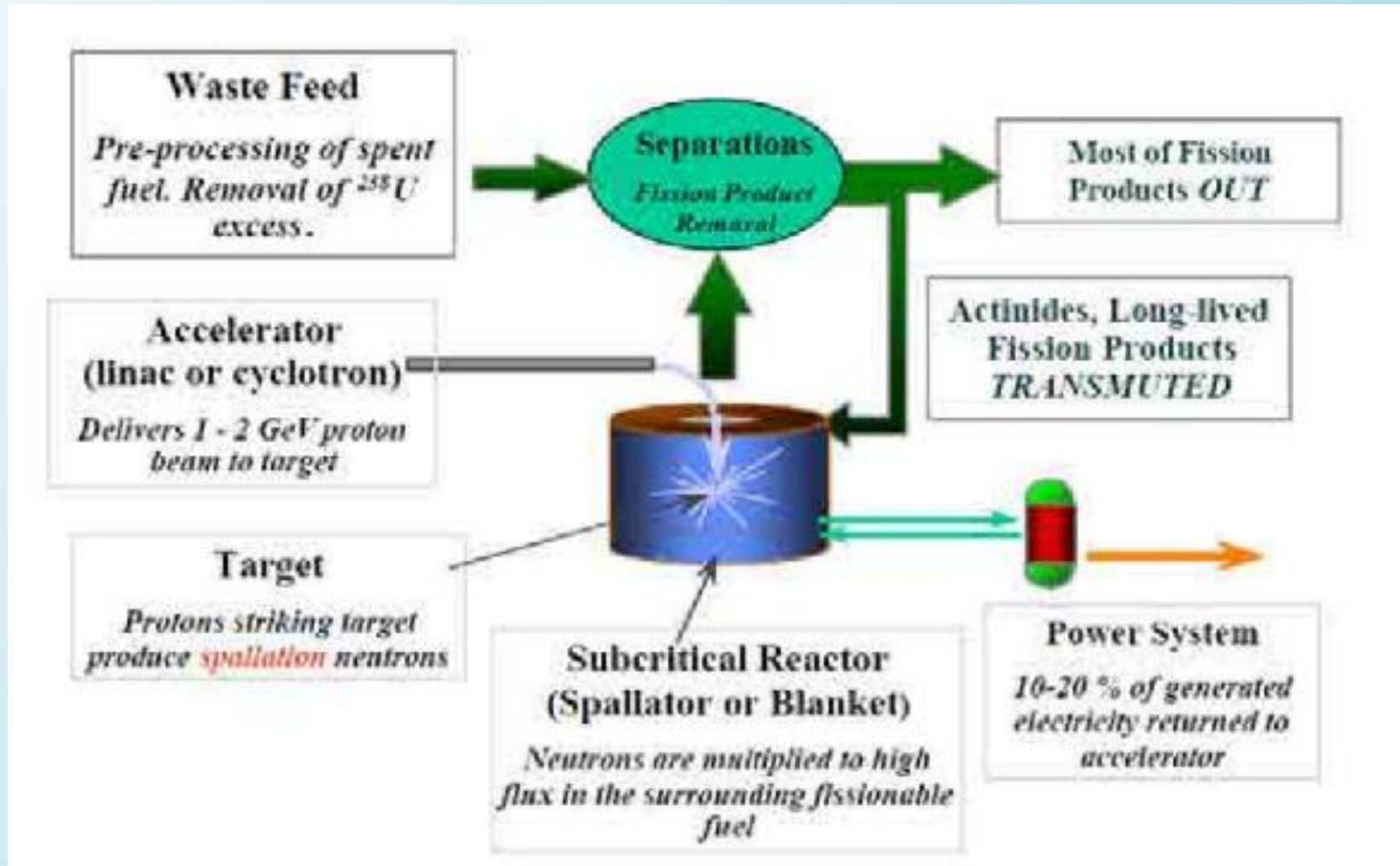


Skematik konfigurasi tokamak makro dan sistem koordinat^[12]

- $\hat{\phi}$ menyatakan arah toroidal, $\hat{\theta}$ menyatakan arah poloidal, dan $\hat{r}$ menyatakan arah radial



Accelerator Driven System (ADS)



Karakteristik ADS

- Menggunakan akselerator dalam orde min GeV untuk memicu reaksi spalasi yang menghasilkan banyak neutron
- Bahan fisil berada dalam reaktor sub kritis
- Banyak dikembangkan untuk menghasncurkan limbah radioaktif, namun dapat juga digunakan sebagai energy amplifier
- Memiliki Tingkat keselamatan yang secara umum lebih tinggi dari PLTN konvensional
- 10-20% Listrik yang dihasilkan digunakan untuk akselerator

Burn-up characteristics of ADS system utilizing the fuel composition from MOX PWRs spent fuel

Marsodi ^a  , A.S. Lasman ^a, K. Nishihara ^b , T. Osugi ^b, K. Tsujimoto ^b,
Marsongkohadi ^c, Z. Su'ud ^c 

KESIMPULAN

- PLTN generasi III+ dan generasi IV merupakan sistem energi nuklir yang dapat diharapkan untuk mendukung upaya menuju carbon net zero
- Small Modular Reactor (SMR) dan PLTN PWR ukuran besar yang telah menerapkan keselamatan inheren/pasif merupakan PLTN yang paling siap diimplementasikan
- Diantara PLTN Generasi IV, maka sodium fast reactor dan VHTR merupakan jenis yang paling cepat masuk komersial (sudah ada yang beroperasi menghasilkan listrik)
- Untuk Lead/lead-Bismuth fast reactor(LFR) dan Molten Salt Reactor (MSR) sedang dalam tahap pengembangan dengan tantangan mengatasi korosi sistem pendingin dan diharapkan masuk fase komersial dalam 10-20 tahun ke depan

KESIMPULAN (2)

- Untuk Gas Cooled fast reactors (GFR) sedang dalam tahap pengembangan dan diharapkan dapat masuk komersial dalam 15-25 tahun ke depan
- Untuk Supercritical Water Cooled Reactor (SCWR) sedang dalam tahap pengembangan dan diharapkan dapat beroperasi komersial dalam 20-40 tahun ke depan
- Untuk reactor fusi nuklir maka jenis TOKAMAK merupakan yang paling banyak dikembangkan dan sedang dalam jalur untuk realisasi sistem efektif pertamanya dengan program ITER yang diharapkan dapat beroperasi sekitar 2050-2060.
- Komersialisasi energi fusi nuklir diperkirakan memerlukan waktu 50-100 tahun
- ADS banyak dikembangkan terutama untuk mendukung penanganan limbah radioaktif. Secara prinsip teknologi dapat diimplementasikan 15-25 tahun ke depan

Referensi terpilih

1. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
2. Perpres no 32 tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional
3. H. Sekimoto, et al, "CANDLE: The New Burnup Strategy", Nuclear Science and Engineering, 139, 1-12 (2001),
4. Zaki S and H. Sekimoto: "Optimization of Modified Candle Burnup Scheme Based Long Life Pb-Bi Cooled Fast Reactor with Natural Uranium as Fuel Cycle Input ", PBNC 2008 Conference, Oct. 11-18, 2008, Aomori Japan.
5. Zaki Su'ud and H Sekimoto, The prospect of gas cooled fast reactors for long life reactors with natural uranium as fuel cycle input, Annals of Nuclear Energy Vol. 54 , pp. 58-66, 2013
6. 168. Syarifah, R.D., Su'ud, Z., Basar, K., (...), Pattipawaej, S.C., Ilham, M.: Comparison of uranium plutonium nitride (U-Pu-N) and thorium nitride (Th-N) fuel for 500 MWth gas-cooled fast reactor (GFR) long life without refueling, International Journal of Energy Research 42(1), 2018, pp. 214-220

Rereferensi terpilih (2)

7. Widiawati et al. Annals of Nuclear Energy, 2025, Vol. 217, 111328
8. Ndayiragije et al. , Kerntechnik, 2024, vol. 89 no 5, p. 595-605
9. Afifah et al., Nuclear Engineering and Design, 2024, Vol 425, 113340
10. Widiawati et al. , Annals of Nuclear energy, 2022, vol 171, 109003
11. Widiawati et al., Int Journal of Energy Research, 2021, vl 45, no. 8, p. 12317
12. Zaki S. and H. Sekimoto : Safety Aspect of Long Life Small Safe Power Reactors, Annals of Nuclear Energy (1995).
13. Zaki S. and H. Sekimoto : Design and Safety Aspect of Lead and Lead Bismuth Cooled Long-Life Small-safe Fast Reactor for Various Core Configuration, Journal of Nuclear Science and Technology 32/9 (1995).
14. Zaki S. and H. Sekimoto : Accident Analysis of lead or lead-bismuth Cooled Small Safe Long-life Fast Reactor Using Metallic or Nitride fuel, Nuclear Eng. And Design 162(1996), p. 205-222.

Referensi terpilih (3)

15. Lapanporo, B.P., Su'Ud, Z., Mustari, A.P.A.: [Comparison of the neutronic properties of the \(Th-233U\)O₂, \(Th-233U\)C, and \(Th-233U\)N fuels in small long-life PWR cores with 300, 400, and 500 MWth of power](#), *Nukleonika*(2024), 69(1), pp. 3–12
16. Ndayiragije, J.P., Su'ud, Z., Waris, A.: [A comparison of neutronic studies on 400 MW thermal fast reactor with modified CANDLE burn-up schemes using helium gas, lead bismuth eutectic and liquid sodium coolants](#), *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*(IJNEST)(2024), 17(1), pp. 66–84
17. Irka, F.H., Su'Ud, Z., Irwanto, D., Khotimah, S.N., Sekimoto, H., Design study of small modular gas-cooled fast reactor employing modified CANDLE burnup with radial direction shuffling scheme,(2023) *Kerntechnik*, 88 (5), pp. 566-576.
18. Miftasani, F., Widiawati, N., Trianti, N., Salma Salsabila, D., Setiadipura, T., Wulandari, C., Irwanto, D., Permana, S., Su'ud, Z., Comparison of thermal-hydraulic calculation in 100 MWt thorium-based HTGR using SiC and ZrC TRISO coated fuel particle, (2023) *Nuclear Engineering and Design*, 412, art. no. 112463,
19. Rafliis, H., Su'ud, Z., Waris, A., Irwanto, D., Core design selection for a long-life modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code, (2022) *International Journal of Energy Research*, 46 (7), pp. 9389-9403.

Referensi terpilih (4)

20. Miftasani, F., Su'ud, Z., Irwanto, D., Permana, S., Comparison of neutronic aspects in high-temperature gas-cooled reactor using ZrC and SiC Triso particle with 50 and 100 MWt power, (2022) International Journal of Energy Research, 46 (4), pp. 4852-4868.
21. Maemunah, I.R., Su'ud, Z., Waris, A., Irwanto, D., Tritium Breeding Performance Analysis of HCLL Blanket Fusion Reactor Employing Vanadium Alloy (V-5Cr-5Ti) as First Wall Material, (2022) Science and Technology of Nuclear Installations, 2022, art. no. 5300160, .
22. Raflis, H., Muhammad, I., Su'ud, Z., Waris, A., Irwanto, D., Reflector materials selection for core design of modular gas-cooled fast reactor using OpenMC code, (2021) International Journal of Energy Research, 45 (8), pp. 12071-12085
23. Shafii, M.A., Septi, R., Handayani Irka, F., Arkundato, A., Su'ud, Z., Neutronic analysis of sodium-cooled fast reactor design with different fuel types using modified CANDLES shuffling strategy in a radial direction, (2021) International Journal of Energy Research, 45 (8), pp. 12272-12283.