



# Desain dan Sistem PLTN (Nuclear Power Plant System and Design)

Disampaikan pada: *FTC Reactor Engineering* 18 Februari 2025

Mohammad Dhandhang Purwadi  
Perekayasa Ahli Utama

**Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, BRIN**



# Daftar Isi

- Sejarah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)
- Prinsip Dasar Reaktor Nuklir Dalam PLTN
- Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)
- Desain Teras & Bejana Reaktor PLTN
- Konsep Desain Sistem Pendingin PLTN
- Konsep Desain Keselamatan PLTN & Daur Bahan Bakar PLTN
- Perkembangan Teknologi PLTN

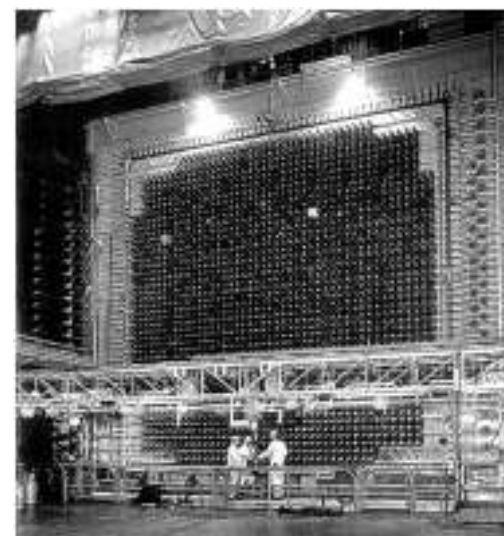
# Sejarah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

# Keberhasilan Realisasi Reaksi Fisi Kontinu



- Reaksi fisi nuklir pertama dalam eksperimen, Enrico Fermi 1934
- Reaktor fisi kontinu berhasil dikendalikan dalam Chicago Pile 1 (CP-1), Desember 1942

Sukses CP-1, mendasari reaktor rahasia di Hanford yang besar, untuk produksi plutonium, sukses 1945



## Awal Pemanfaatan Tenaga Nuklir



1956, PLTN komersial + fungsi militer pertama, Calder Hall, Inggris (PLTN Magnox 50 MWe, Inggris, 1956)

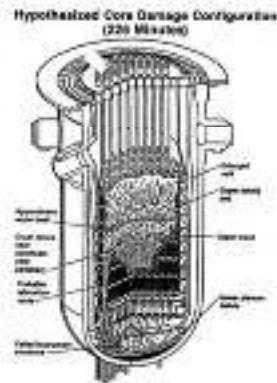


1956, PLTN tipe PWR komersial pertama, murni pembangkit listrik, desain awal untuk propulsi kapal induk pengangkut pesawat tempur (Shipping Port PWR 60 MWe, USA, 1957)

# Kecelakaan Besar PLTN



Kecelakaan parah PLTN PWR Three Mile Island Unit II (TMI II), USA, 1979, tak ada korban jiwa (**Level INES: 5**)



Kecelakaan parah PLTN Chernobyl Unit IV, Uni Soviet, 1986, 56 korban jiwa langsung (**Level INES: 7**)

# Kecelakaan Besar PLTN Fukushima-I Unit 1-4

- Kecelakaan parah PLTN BWR Fukushima I, reaktor No. 1-4, No. 4 dalam perawatan.
- PLTN tipe BWR komersial versi pertama (Generasi II) dengan teknologi sungkup Mark-I tahun 80-an
- Pembebasan radioaktif dan radius pembebasan 1/10 dari Chernobyl
- Kecelakaan mencapai level INES 7, terjadi pelelehan teras reaktor dan pembebasan zat radioaktif
- Tidak ada korban jiwa akibat radiasi

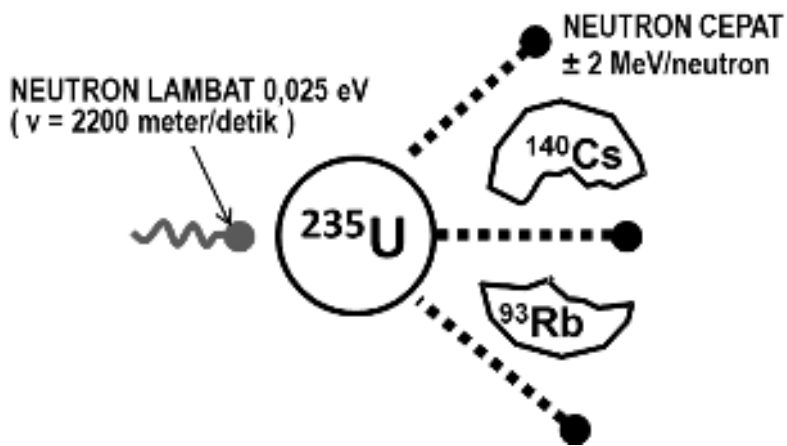


light oil tanks

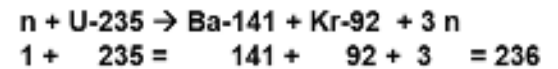
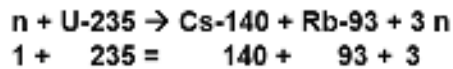
# Prinsip Dasar Reaktor Nuklir Dalam PLTN



# Reaksi Fisi Nuklir (Reaksi Pembelahan Inti)

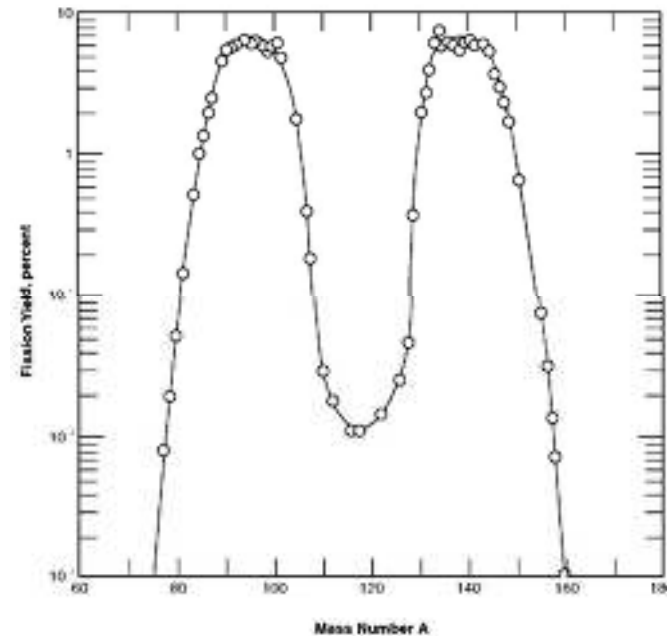


KEKEKALAN MASSA:

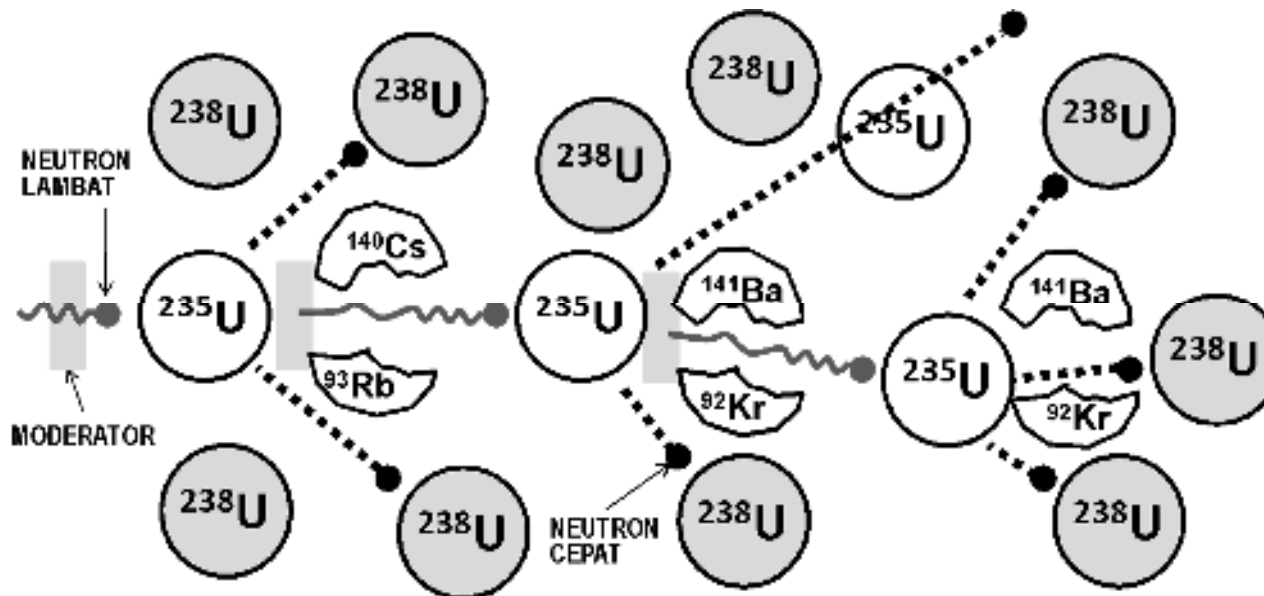


Ek fragmen fisi	169,130 MeV
Ek partikel neutron	4,914 MeV
Energi partikel gamma	12,930 MeV
Ek partikel beta	6,500 MeV
Ek partikel neutrino	8,750 MeV
<b>Total</b>	<b>202,226 MeV</b>

Thermal Neutron Fission of U-235

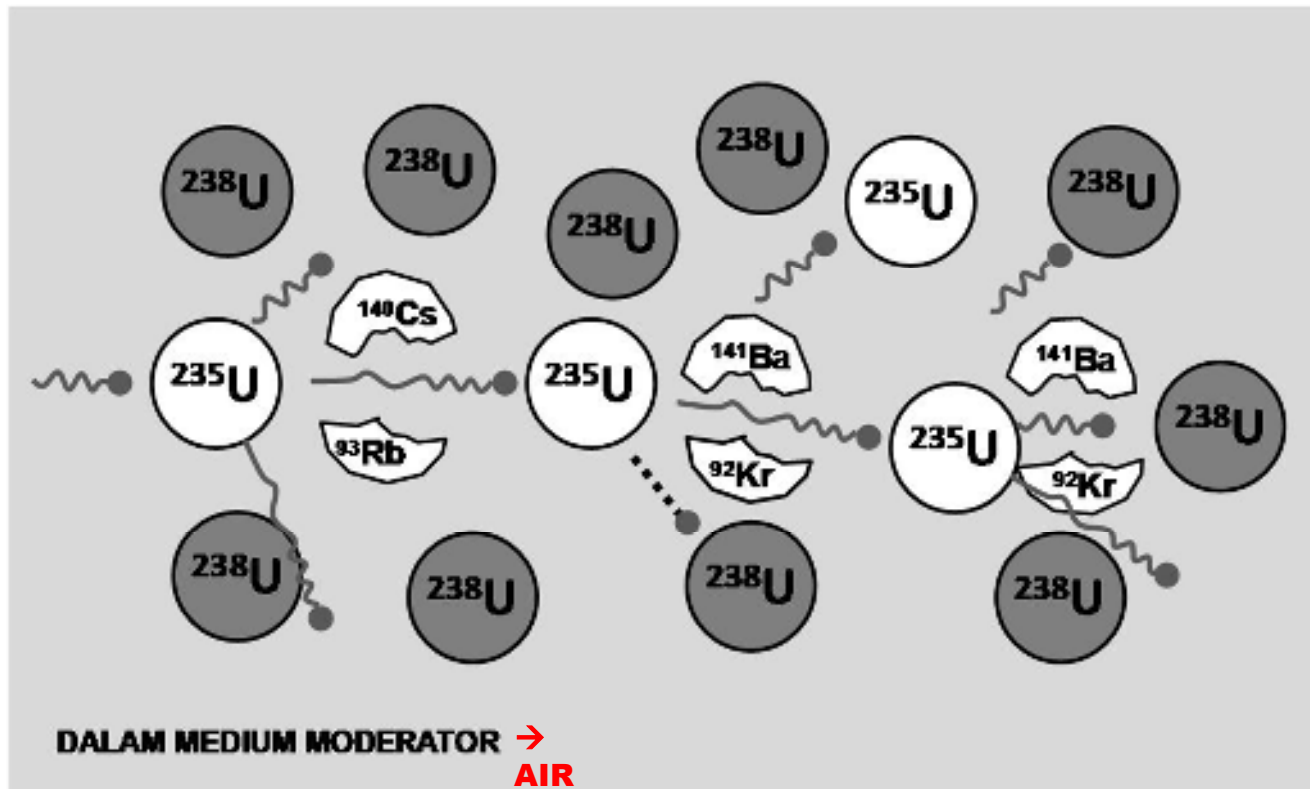


# Kesulitan Mewujudkan Reaksi Fisi Kontinu

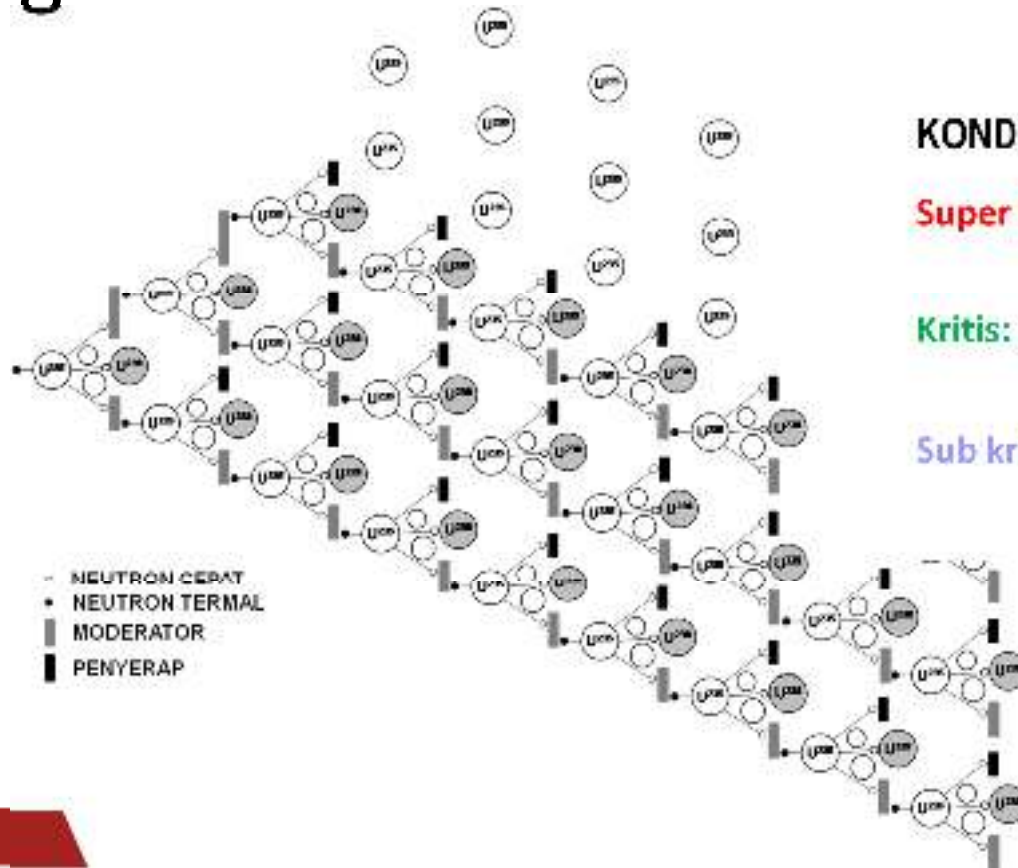


Reaksi fisi secara kontinu sebenarnya sulit untuk diwujudkan, terutama dalam uranium alam, yang mana dalam 1000 atom hanya ada 7 atom isotop U-235 (0,7%) bahan fisil, sisanya 993 atom U-238 (99,3%) bahan fertil

# Pengkondisian Reaksi Fisi Kontinu



# Pengendalian Reaksi Fisi Kontinu



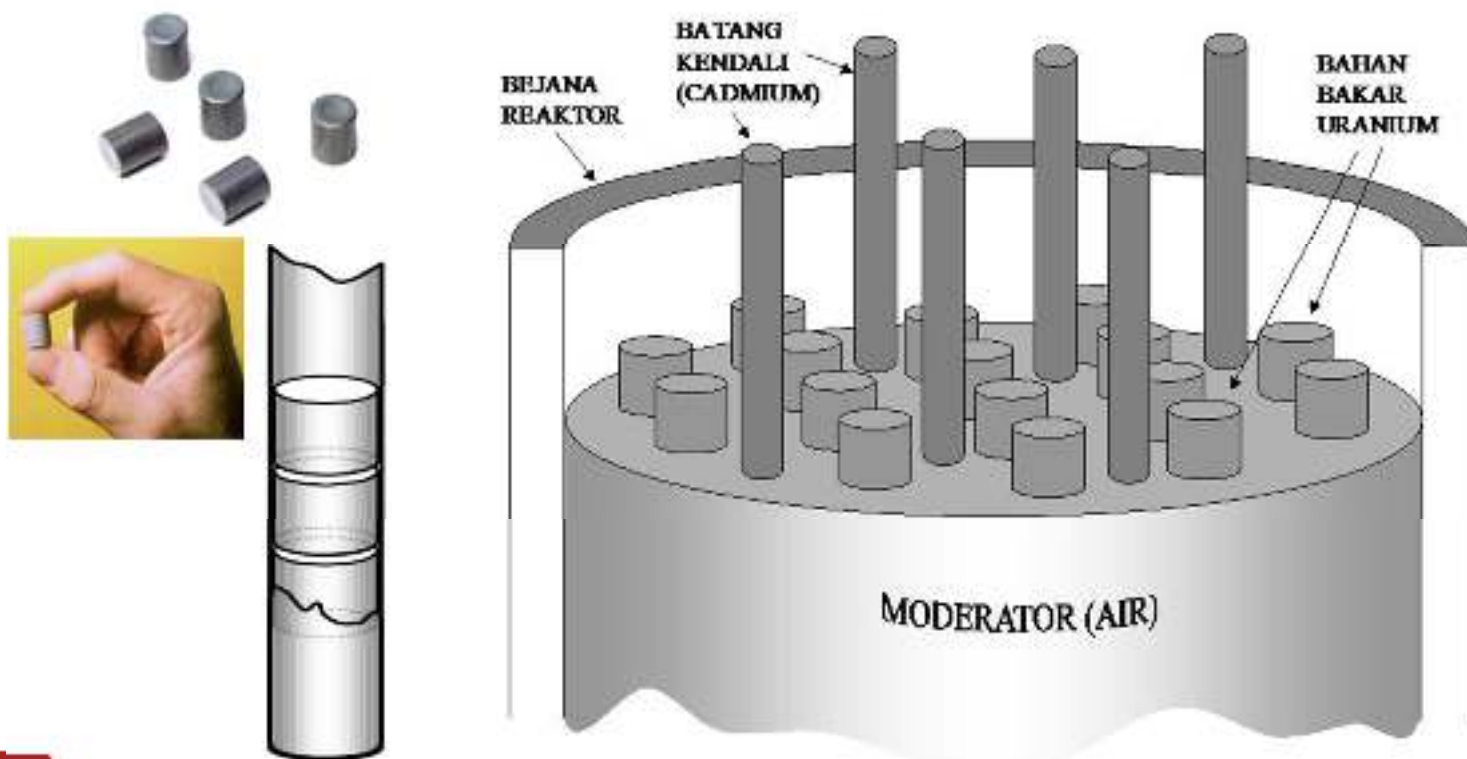
## KONDISI POPULASI NEUTRON

**Super kritis:** populasi neutron meningkat dgn waktu

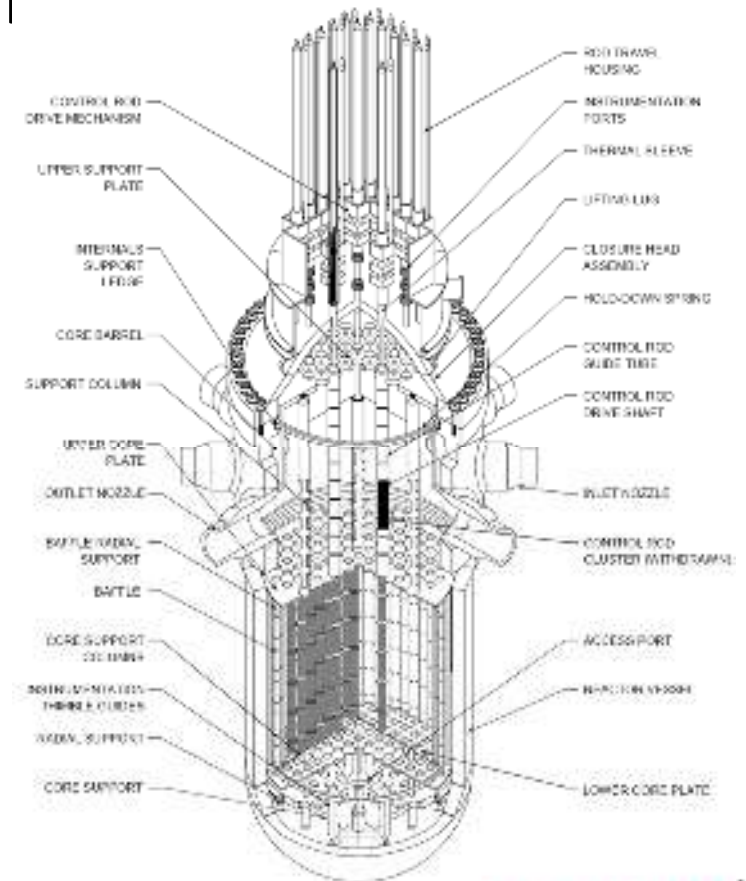
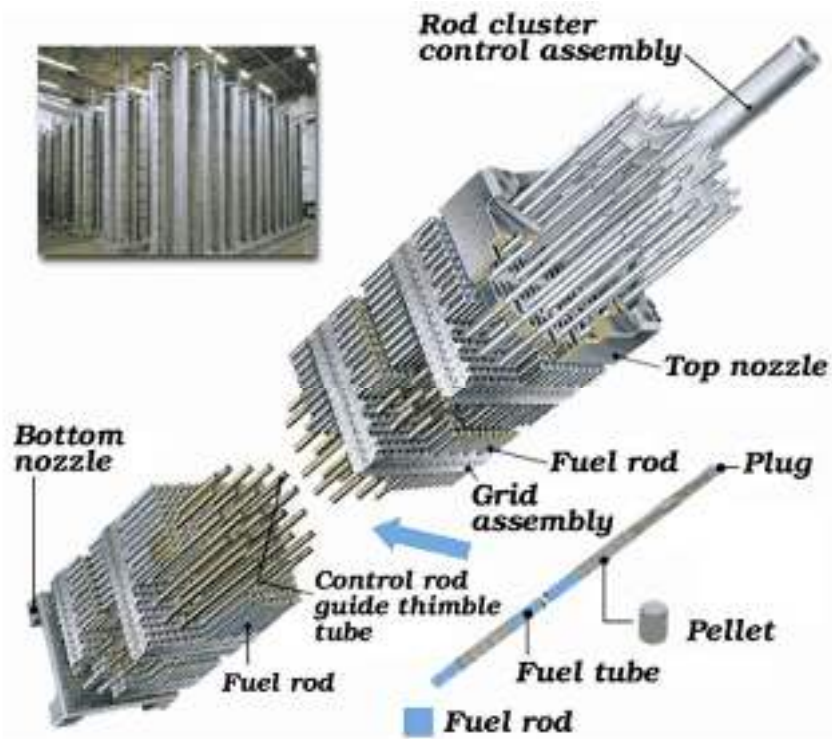
**Kritis:** populasi neutron tetap dari waktu ke waktu

**Sub kritis:** populasi neutron menyusut dgn waktu

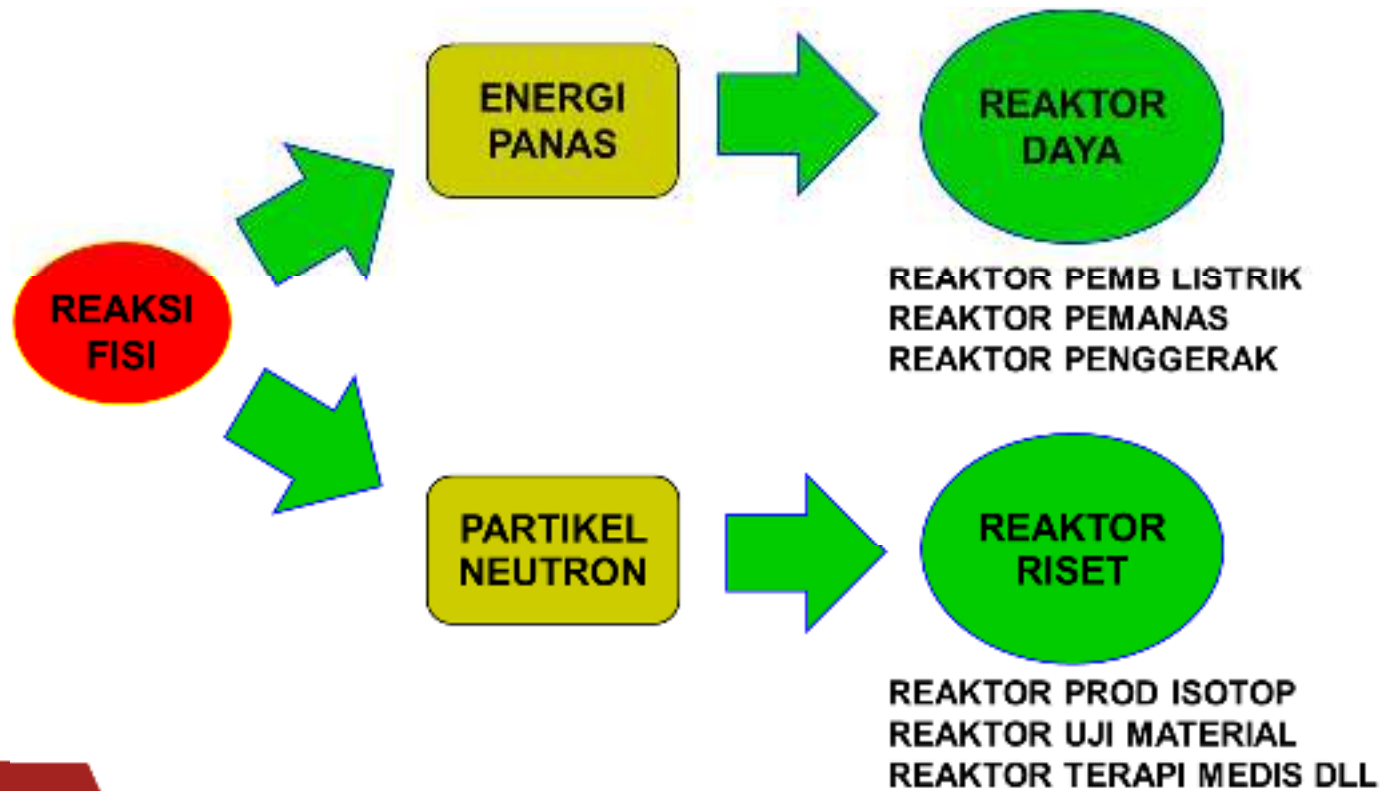
# Konstruksi Dasar Reaktor Nuklir



# Perangkat Bahan Bakar Nuklir DI TM



# Klasifikasi Pemanfaatan Reaktor Nuklir

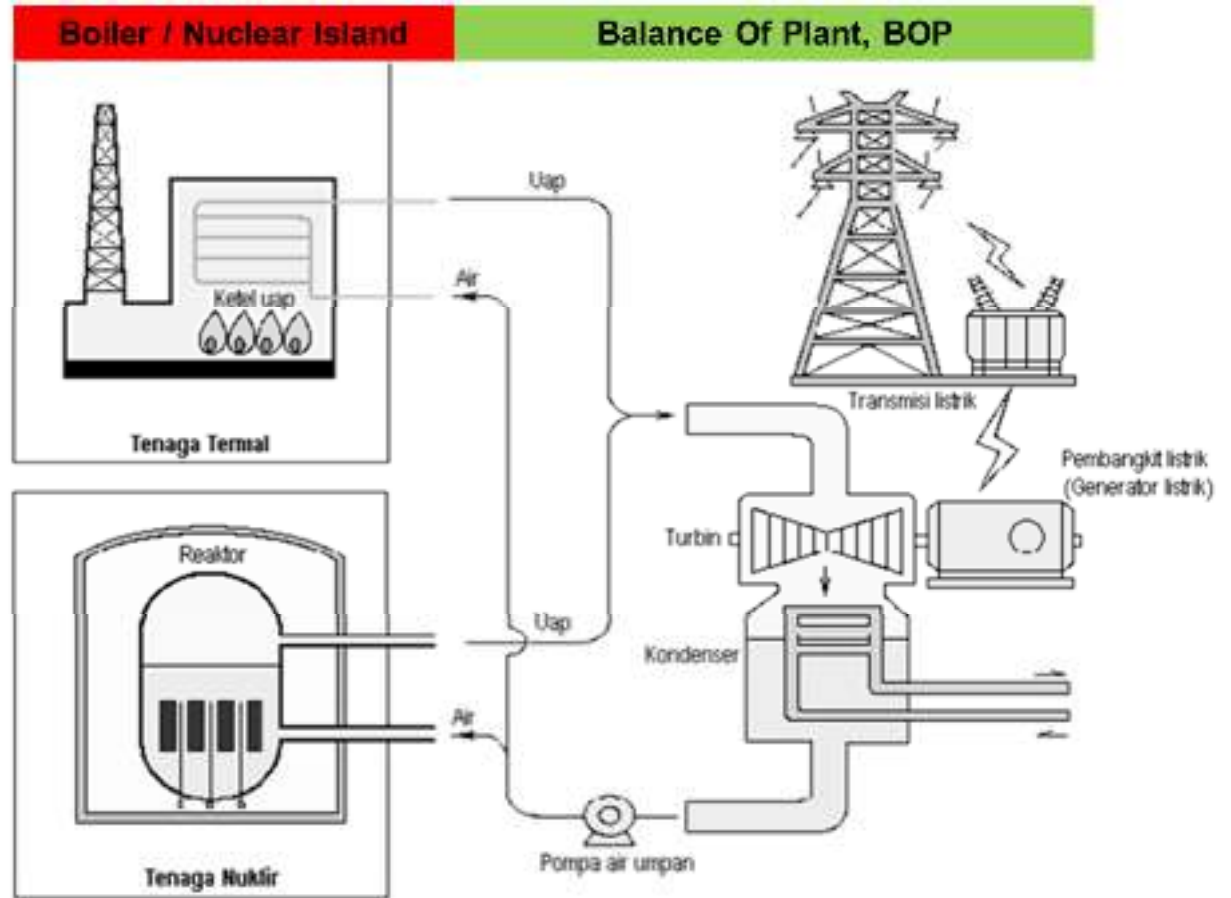


# Tipe/Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

- PLTN dengan pendingin air ringan ( $H_2O$ )
  - PLTN tipe Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor*, BWR)
  - PLTN tipe Reaktor Air Bertekanan (*Pressurized Water Reactor*, PWR)
- PLTN dengan pendingin air berat ( $D_2O$ )
  - PLTN tipe Reaktor Air Berat Bertekanan (*Pressurized Heavy Water Reactor*, PHWR)
  - PLTN tipe *CANada Deuterium Uranium* (CANDU)
  - PLTN tipe *Advanced Thermal Reactor* (ATR)
- PLTN dengan pendingin gas moderator grafit
  - PLTN tipe Reaktor Pendingin Gas (*Gas Cooled Reactor*, GCR ☐ Magnox)
  - PLTN tipe Reaktor Gas Temperatur Tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor* HTGR)
- PLTN dengan pendingin logam cair
  - PLTN tipe Reaktor Pembiak Cepat (*Fast Breeder Reactor*, FBR)



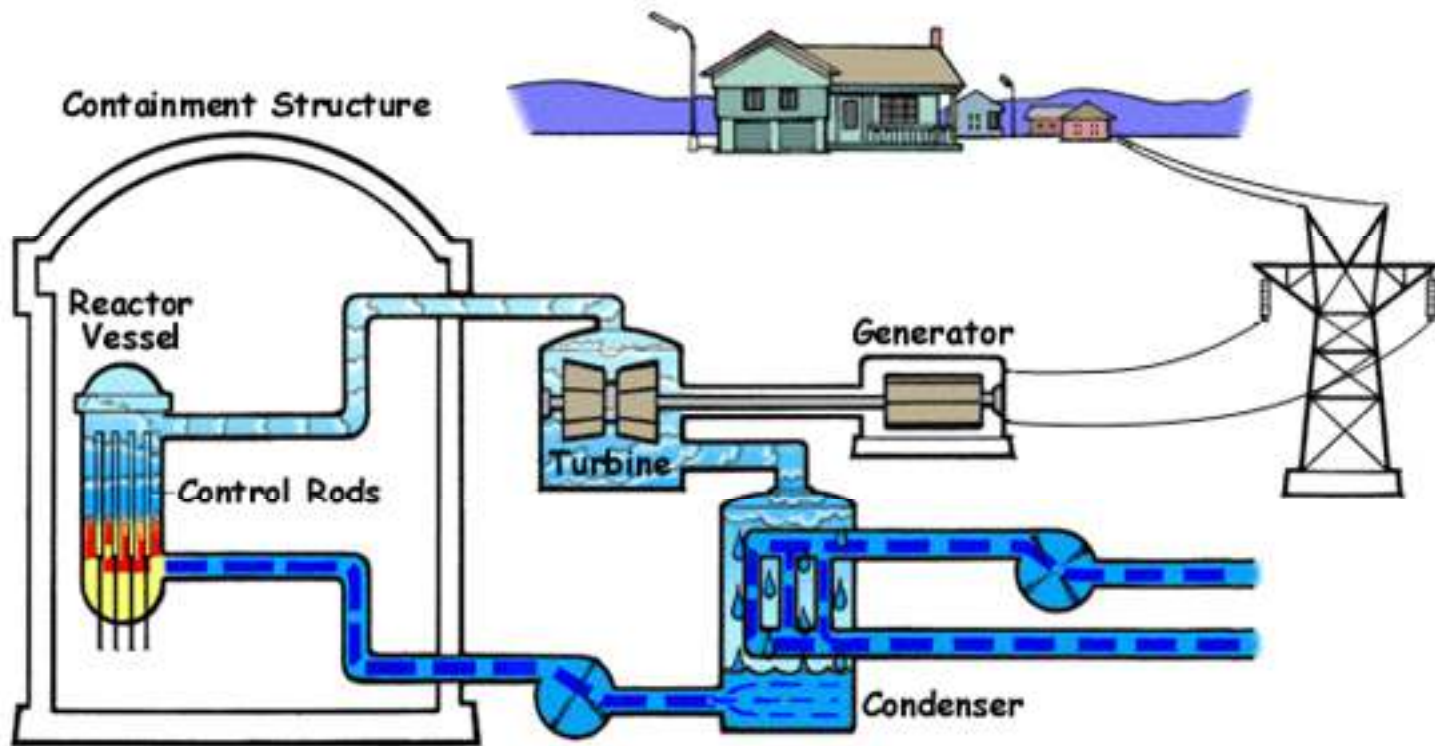
# PLTU vs PLTN



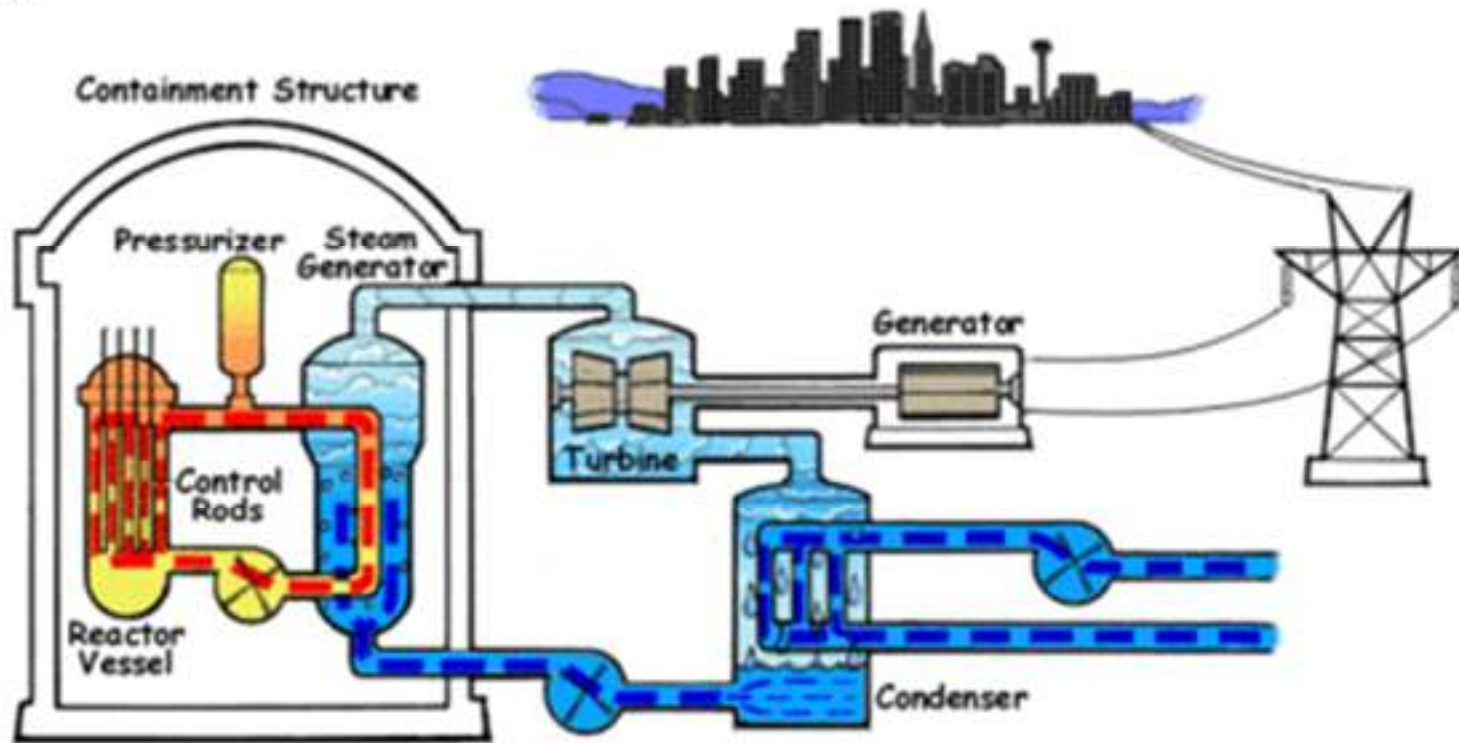


# Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Sistem PLTN)

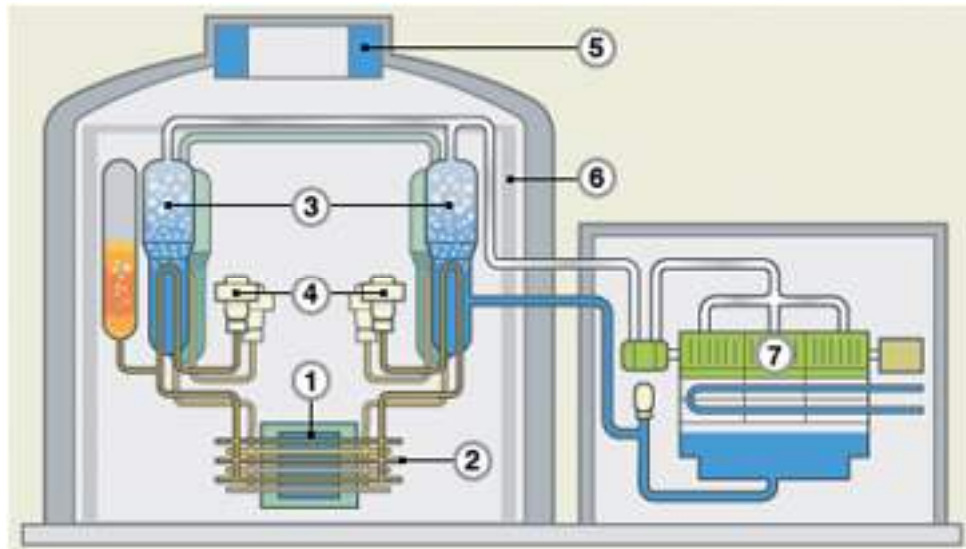
# Sistem Umum PLTN Reaktor Air Didih (BWR)



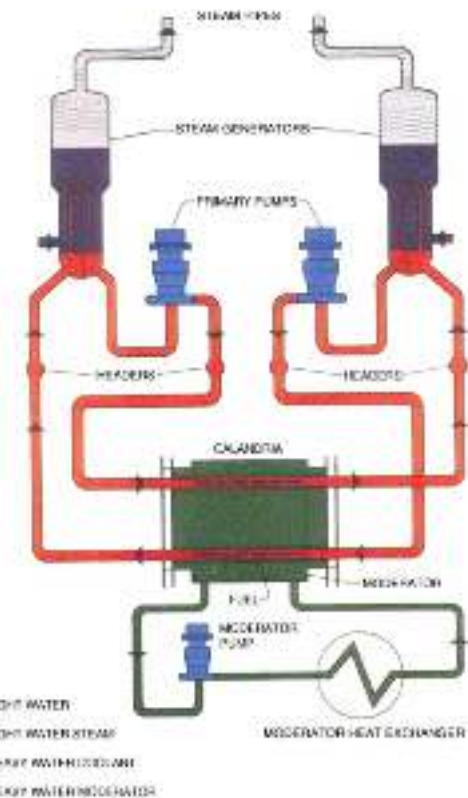
# Sistem Umum PLTN Reaktor Air Bertekanan (PWR)



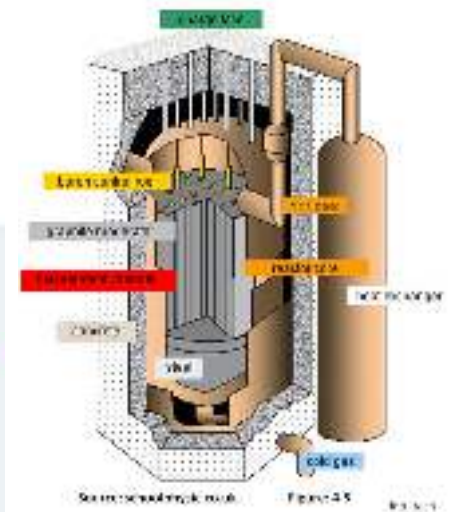
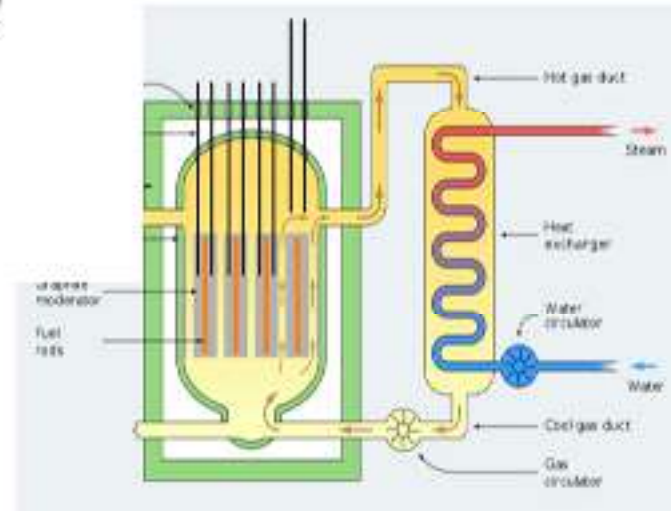
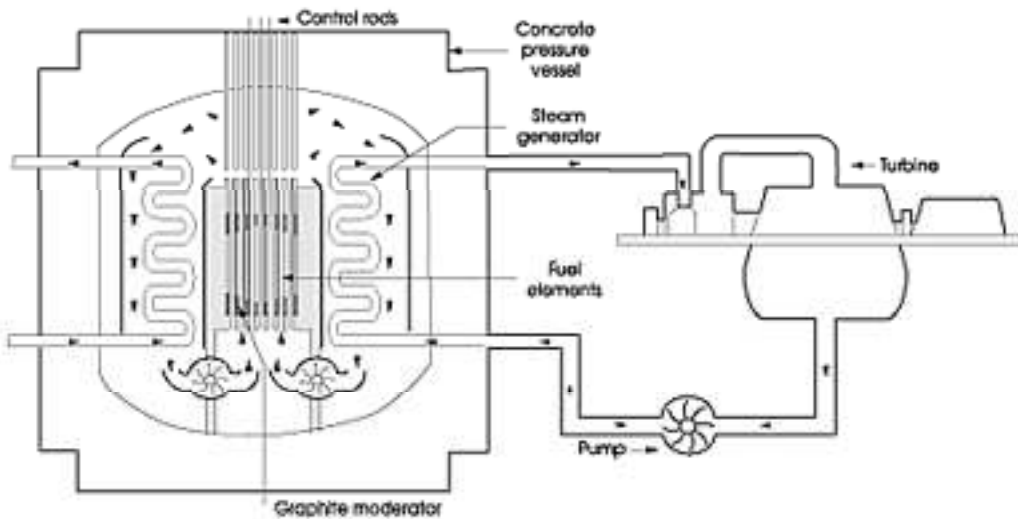
# Sistem Umum Reaktor Air Berat Bertekanan (PHWR)



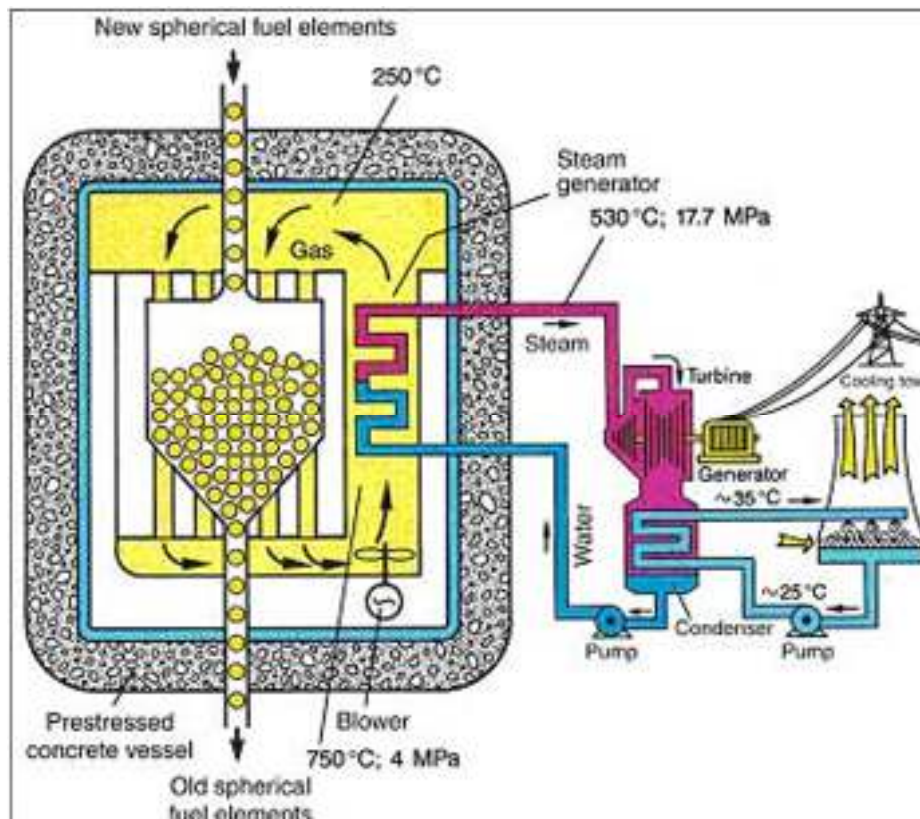
- 1. Reactor core
- 2. Horizontal fuel channels
- 3. Steam generators
- 4. Heat transfer pumps
- 5. Emergency injection system
- 6. Steel containment wall
- 7. Turbine generators



# Sistem Umum PLTN Reaktor Pendingin Gas

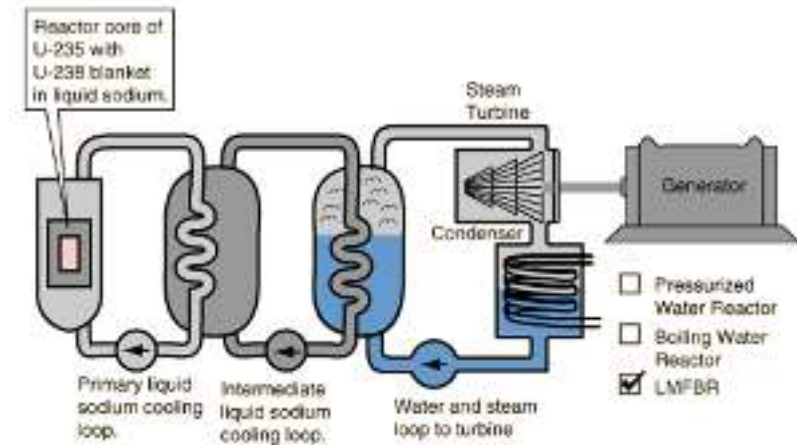
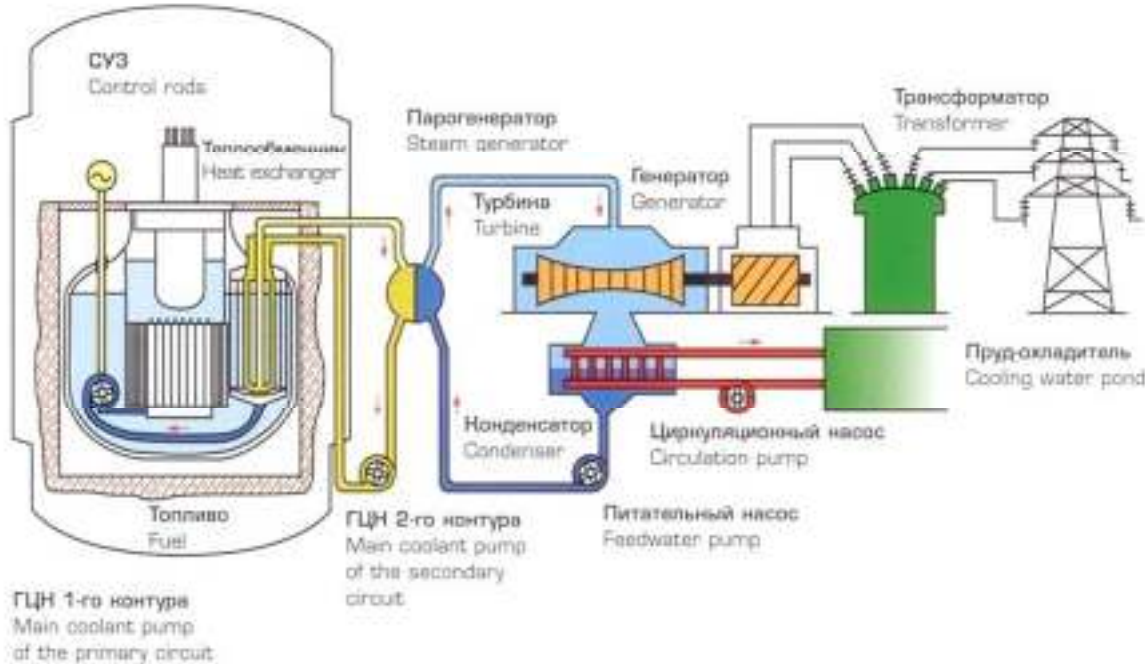


# Sistem PLTN Reaktor Gas Temperatur Tinggi (HTGR)



# Sistem Umum PLTN Reaktor Pembiak Cepat

Reactor BN-600 – Electricity to the consumer

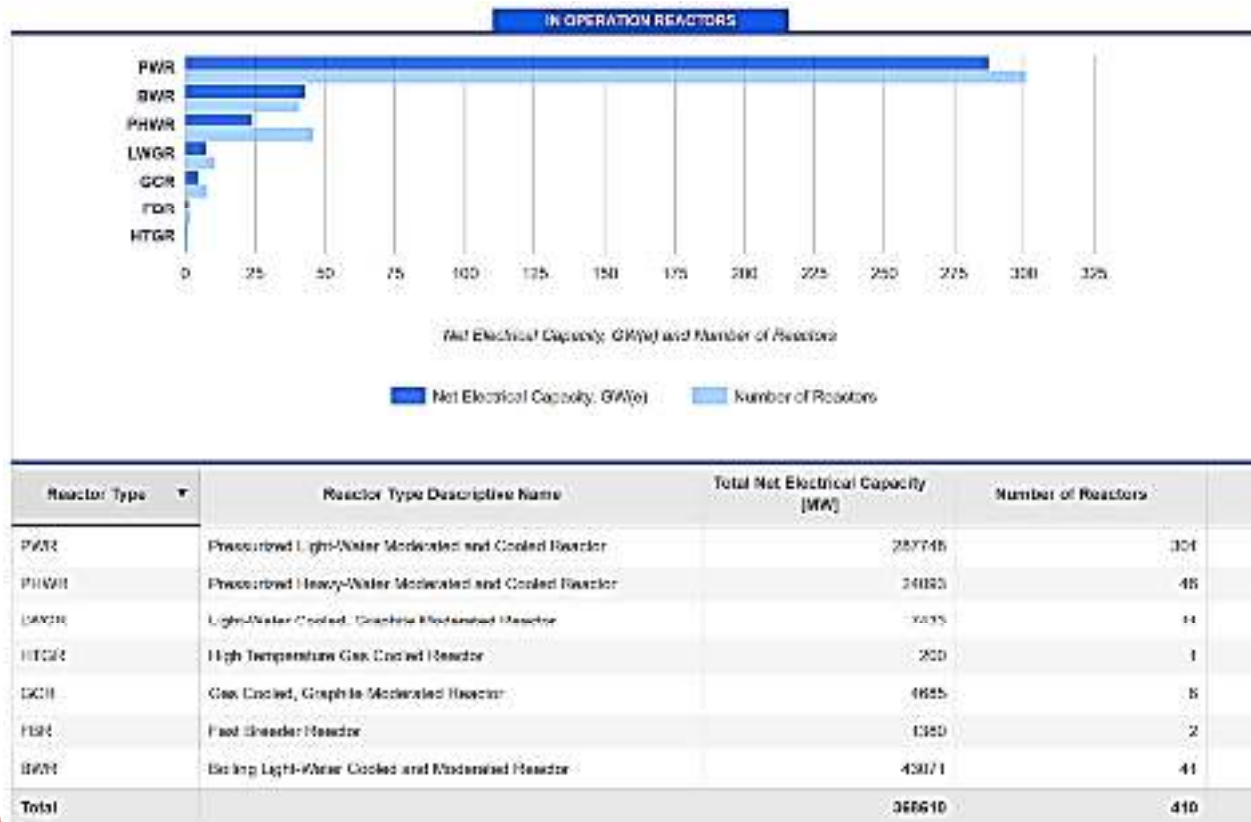




# Kelebihan Reaktor Pembiak Cepat

- Membakar U-235 (bahan fisil), tetapi juga mengubah U-238 (bahan fertil) menjadi bahan fisil lain (Pu-239) dengan kuantitas lebih banyak  
Pembiakan U-238 (bahan fertil)  $\rightarrow$  Pu-239 (bahan fisil)  
 $\eta$  Reaktor pembiak cepat = 2,3 vs  $\eta$  Reaktor termal = 2,07
- Reaktor Pembiak Cepat lebih efisien dalam memanfaatkan uranium daripada reaktor lain yang hanya dapat membakar/mengonsumsi isotop U-235 dalam bahan bakar uranium yang terdiri dari isotop U-235 (bahan fisil) dan U-238 (bahan fertil)  $\rightarrow$  Fuel sustainability
- **Tantangan: persyaratan material dan teknologi tinggi menyebabkan kerumitan teknologi dan mahal**

# Sistem & Desain PLTN Dominan di Dunia



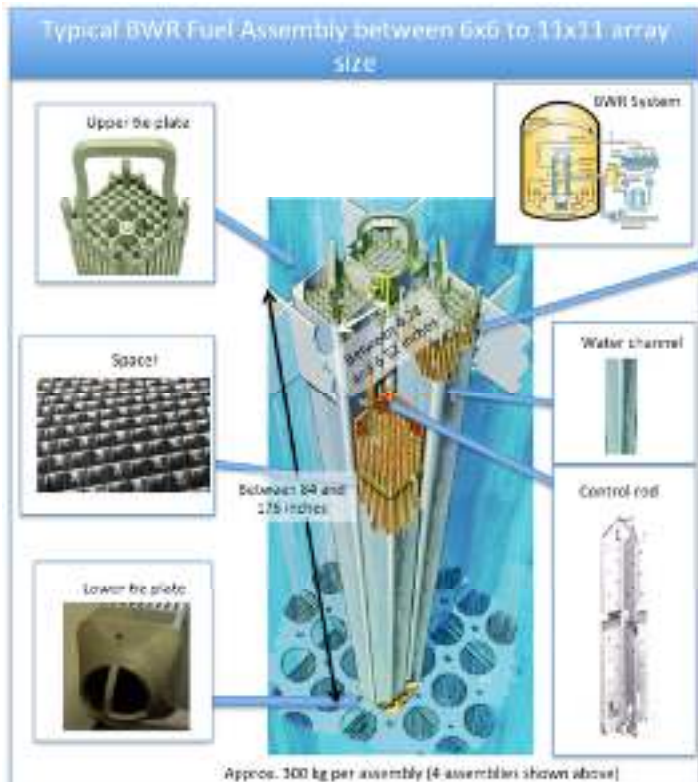
- Tipe PLTN yang banyak digunakan dan masih operasi adalah PLTN tipe PWR
- Dari 410 PLTN yang beroperasi di Dunia saat ini 301 unit (73,4%) adalah PLTN tipe PWR

# Pembangunan Sistem & Teknologi PLTN

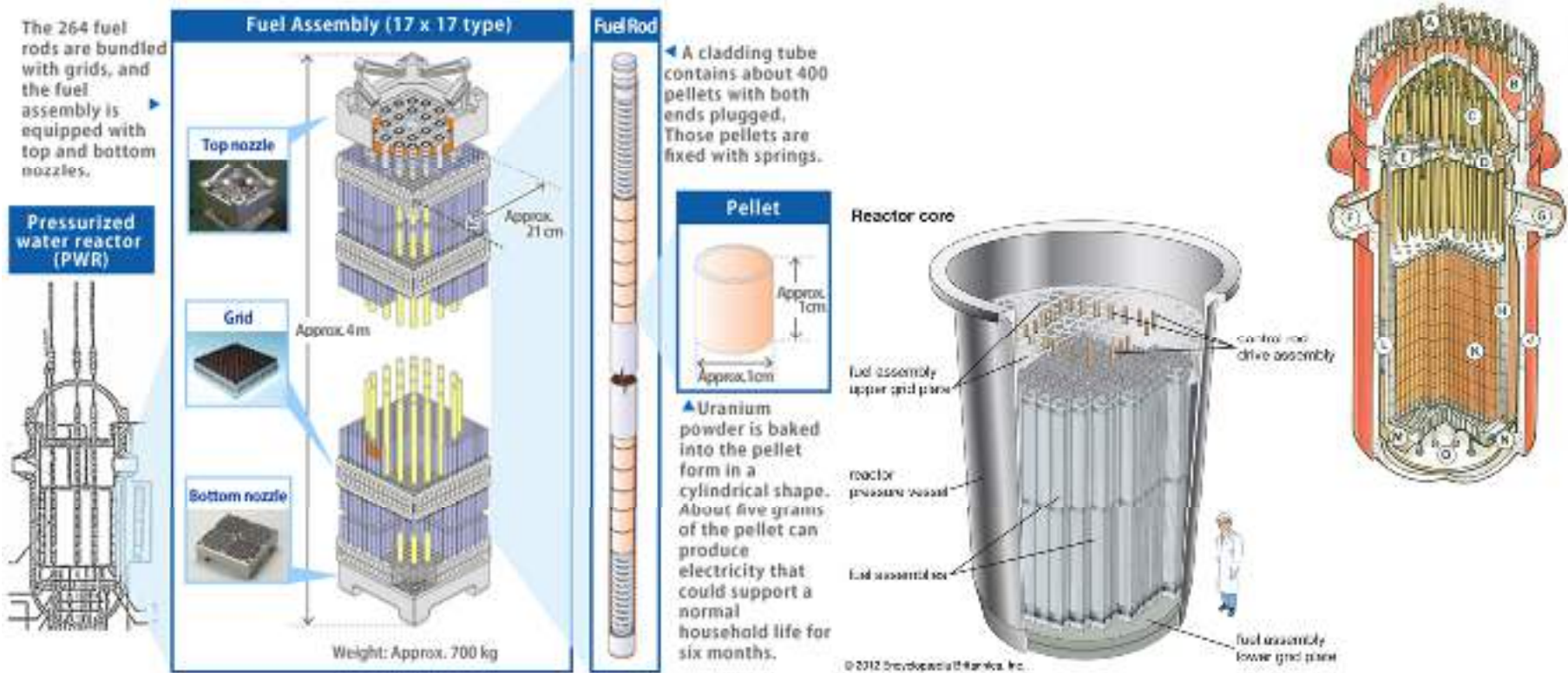
NEGARA YANG SEDANG MEMBANGUN PLTN	PWR	FBR	PHWR	BWR
China(19), Korsel (3), India(4), Bangladesh(2), Iran(1), UEA(1), Turkiye(4), Rusia(2), Inggris(2), Ukraina(2), Perancis(1), Slovakia(1), USA(1), Argentina(1), Brazil(1), Mesir(3)	30 12 3 3 48			
China(2), India(1), Rusia(1)		4		
India(3)			3	
Jepang(2)				2
<b>TOTAL</b>		<b>57</b>		

# Desain Teras & Bejana Reaktor PLTN

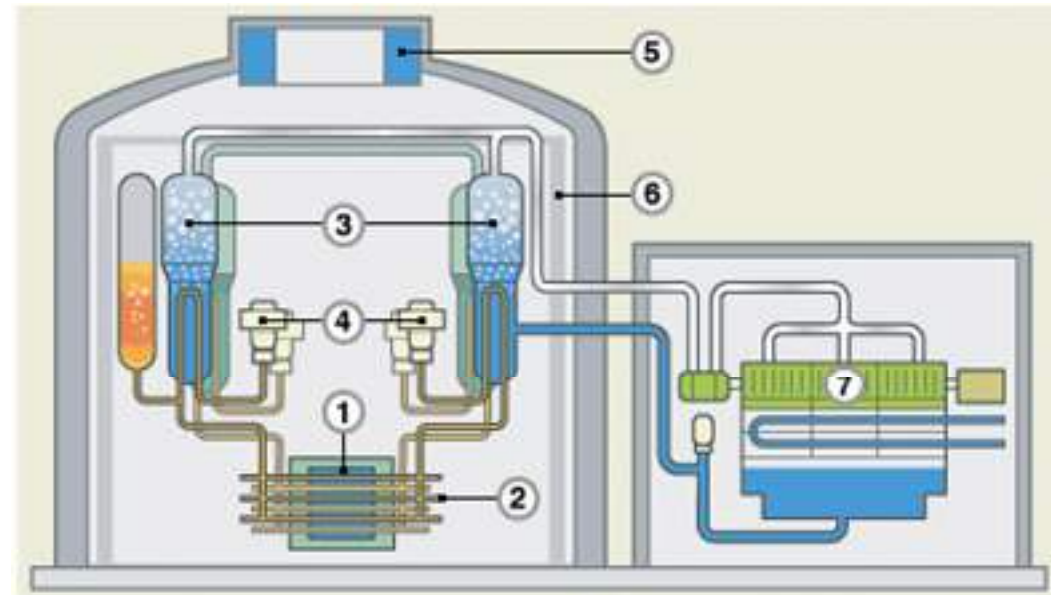
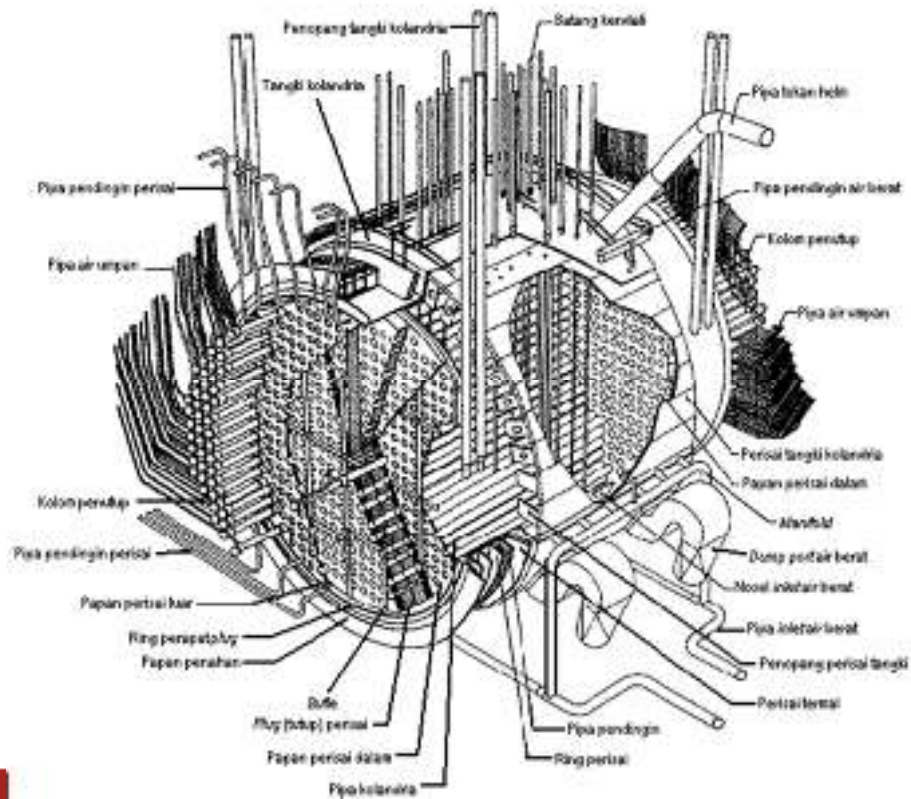
# Teras & Bejana Reaktor PLTN-BWR



# Teras & Bejana Reaktor PLTN-PWR



# Teras & Bejana Reaktor PLTN-PHWR



1. Reactor core
2. Horizontal fuel channels
3. Steam generators
4. Heat transfer pumps
5. Emergency injection system
6. Steel containment wall
7. Turbine generators

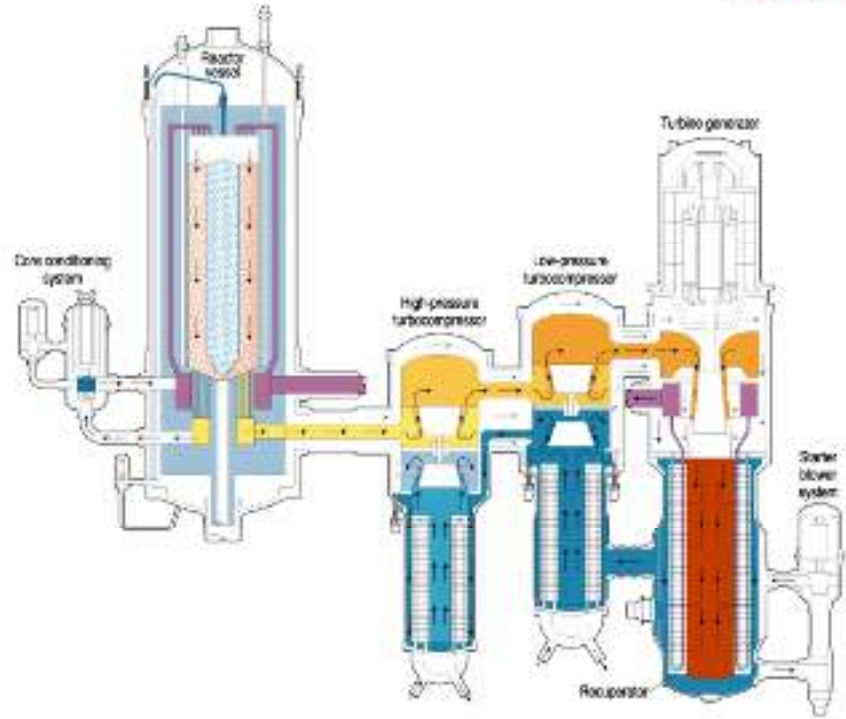


# Teras & Bejana Reaktor PLTN-RGTT

Bahan Bakar Tipe Bola



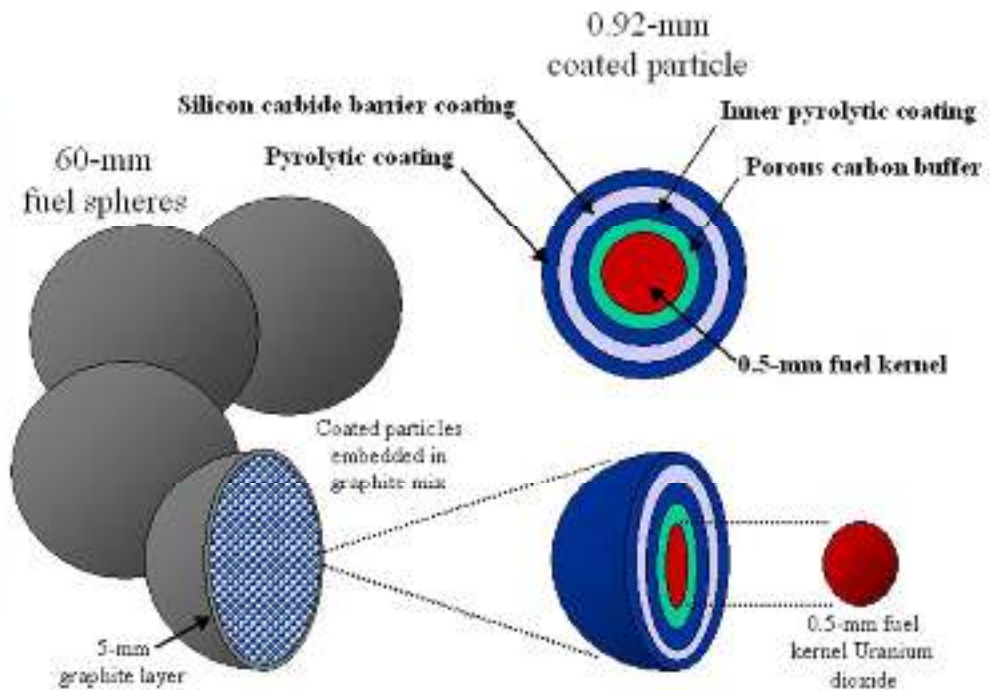
HTR-PM China



PBMR Afrika Selatan

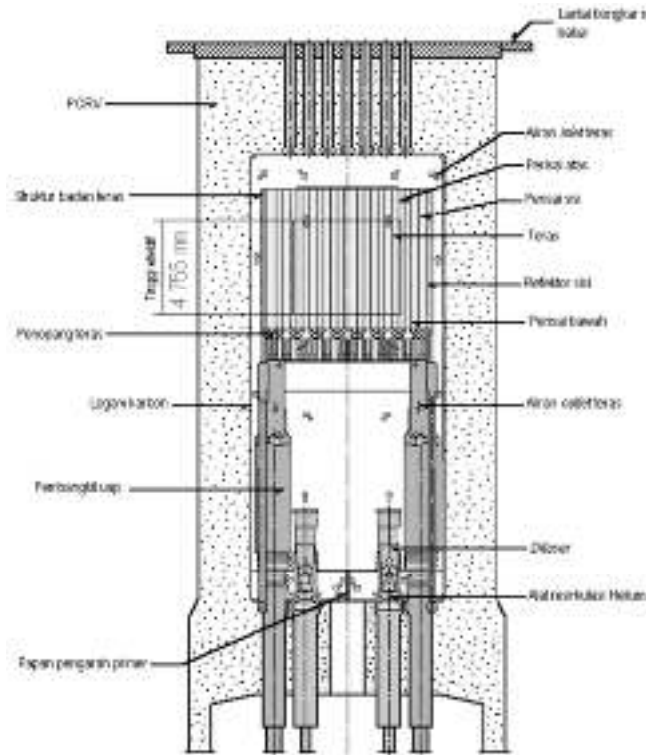


# Bahan Bakar Bola PLTN RGTT (HTGR)

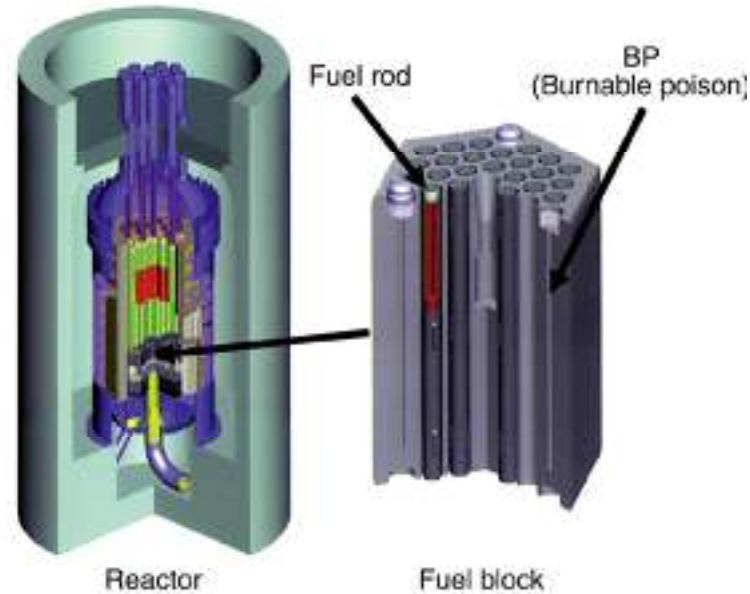


# Teras & Bejana Reaktor PLTN-RGTT

Bahan Bakar Tipe Prismatik

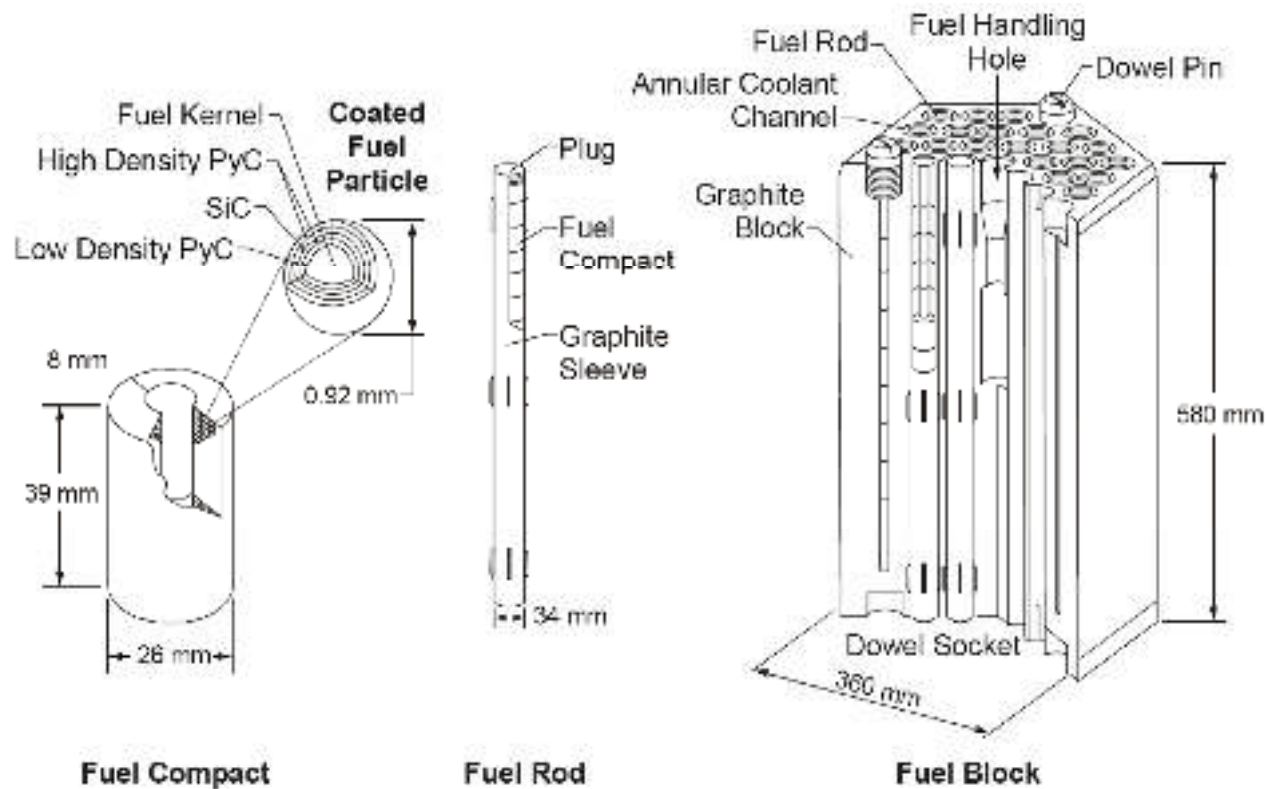


Fort St. Vrain



HTTR Japan

# Bahan Bakar Prismatik PLTN RGTT (HTGR)







# Konsep Desain Sistem Pendingin PLTN

# Sistem Utama PLTN BWR & PWR

## 1. SISTEM KONVERSI ENERGI (SISTEM PENDINGIN)

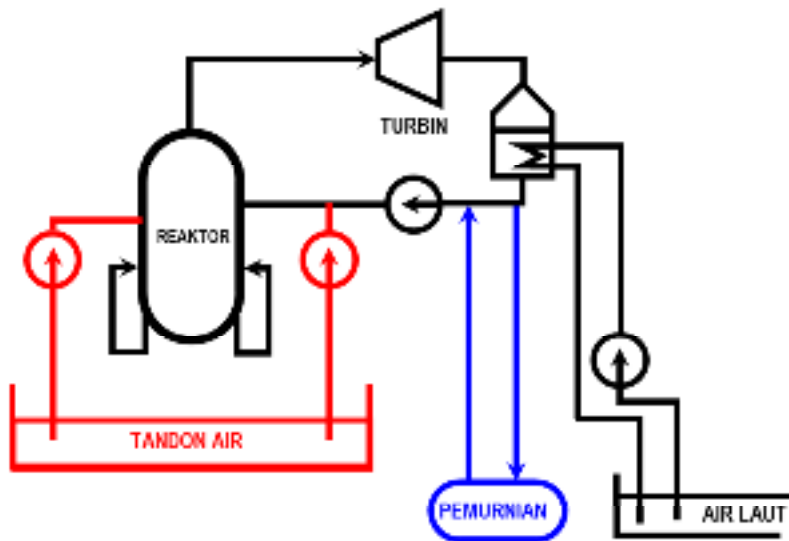
- BWR: UNTAI PRIMER (PRIMARY LOOP)
- PWR: UNTAI PRIMER & SEKUNDER (PRIMARY & SOCONADRY LOOP)

## 2. SISTEM UMPAN FLUIDA MEDIA KONVERSI ENERGI

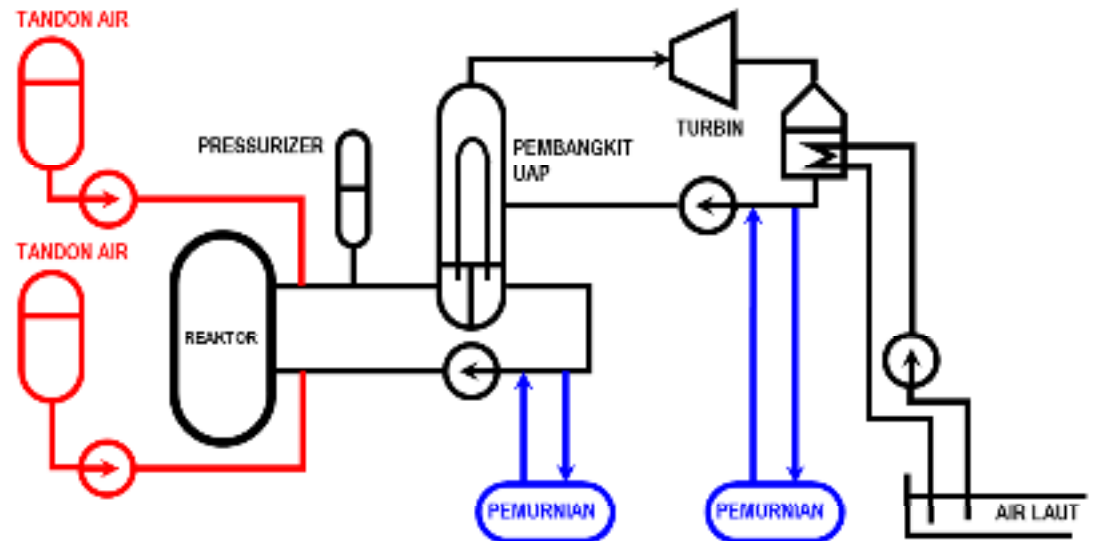
## 3. SISTEM PEMURNIAN FLUIDA MEDIA KONVERSI ENERGI

## 4. SISTEM PENDINGINAN DARURAT

# Desain Umum Sistem Utama PLTN BWR & PWR

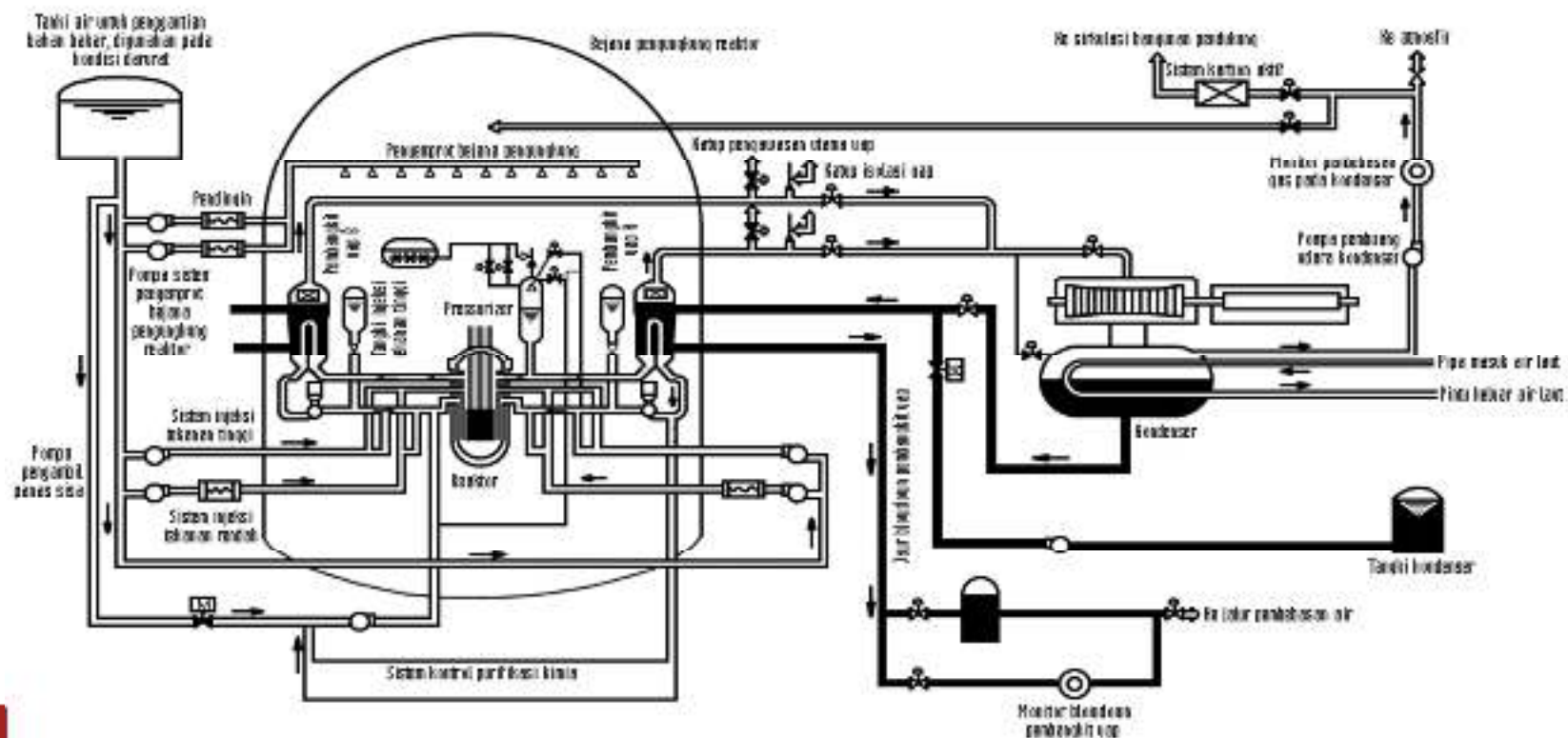


REAKTOR AIR DIDIH (BWR)



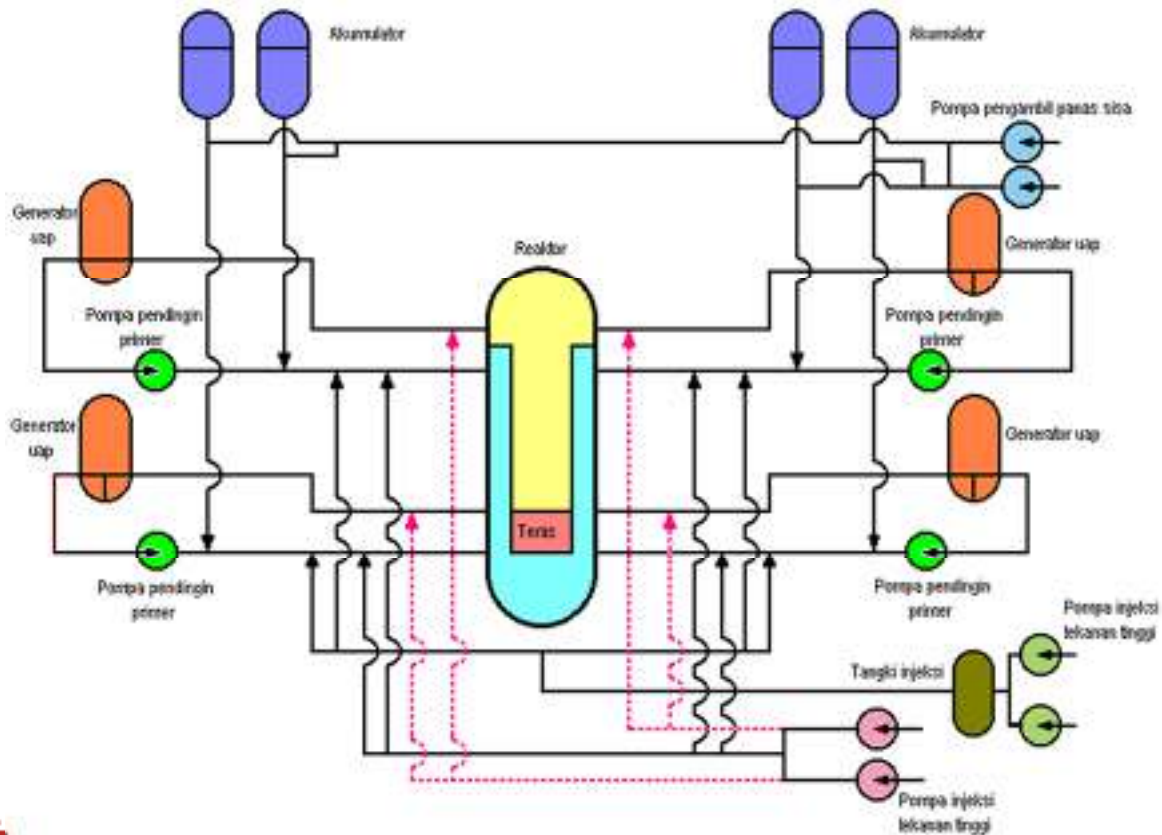
REAKTOR AIR TEKAN (PWR)

# Sistem Pendingin PLTN PWR



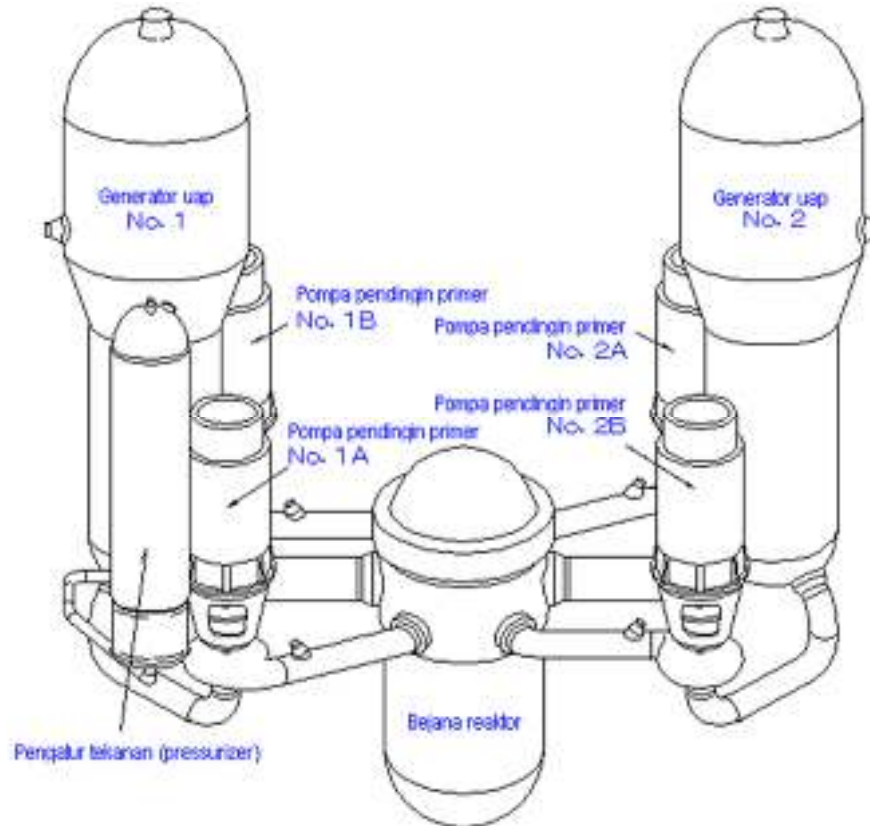


# Sistem Pendingin Darurat PLTN PWR

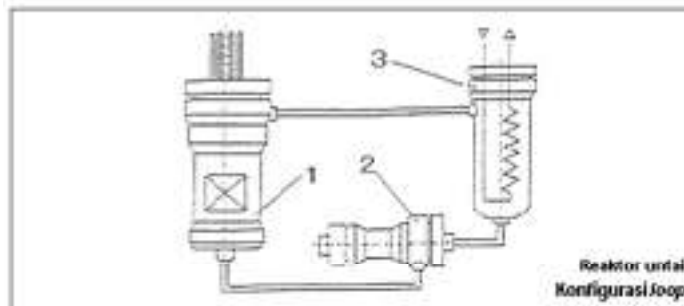




# Topologi Untai Sistem Primer PLTN PWR

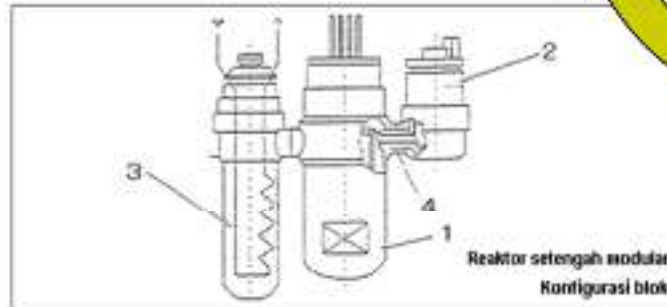


# Tren Simplifikasi Untai Pendingin PLTN PWR



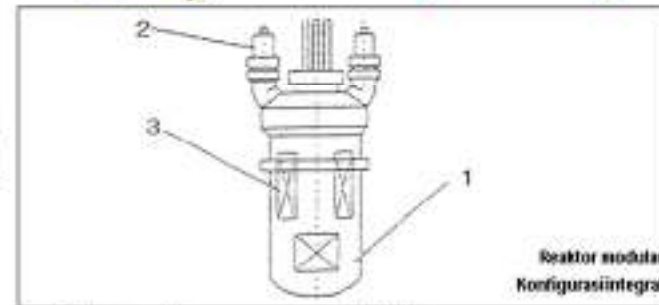
Konfigurasi untai/loop

Konstruksi SMR di tapak



Konstruksi SMR di pabrik,  
massal, efisien, kualitas, cepat

Konfigurasi integral



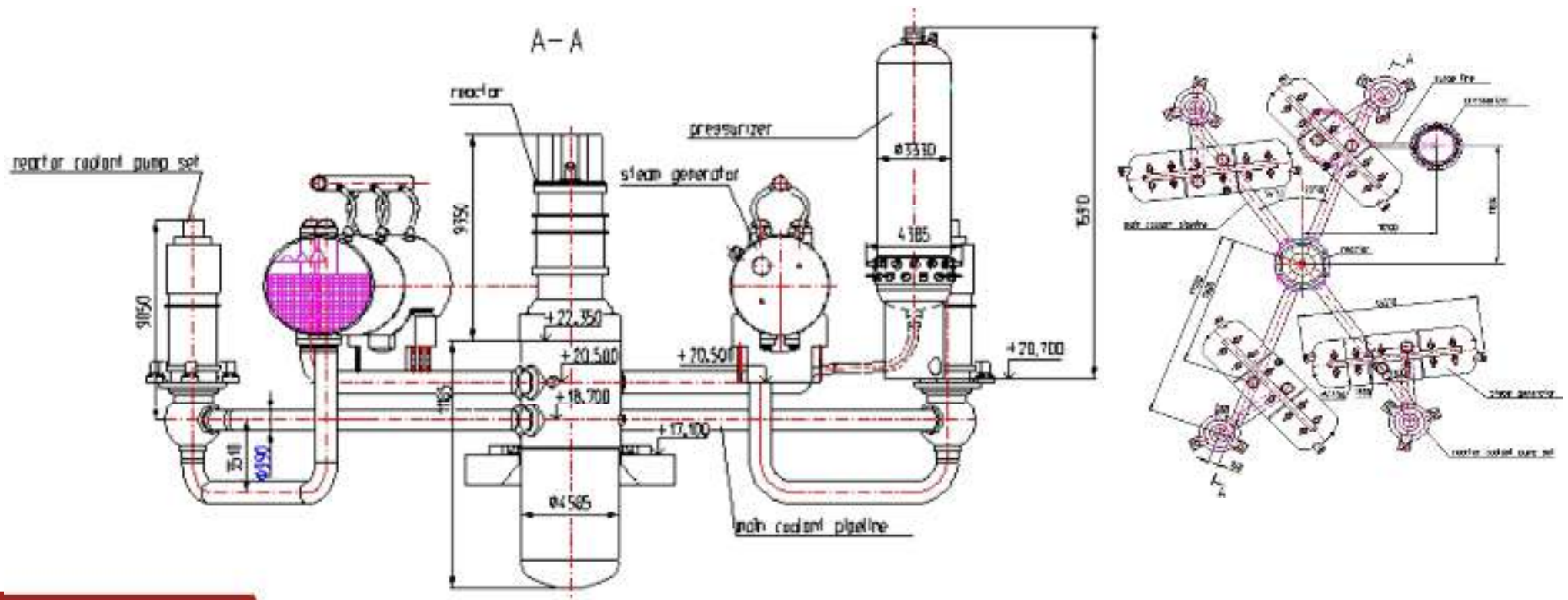
- 1. Bejana reaktor
- 2. Pompa pendingin primer
- 3. Pembangkit uap
- 4. Pipa saluran ganda yang disedemaskan

# Contoh Spesifikasi PLTN PWR

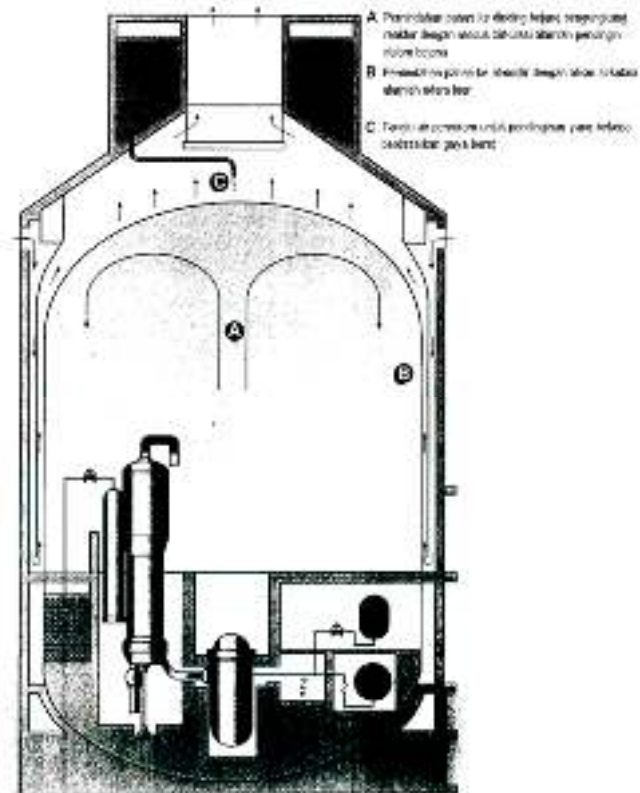
	PWR	APWR
● Daya listrik	1180 MWe	± 1530 MWe
● Daya termal	3411 MWt	± 4450 MWt
● Teras		
- Susunan bahan bakar	17 x 17	Modified 17 x 17
- Jumlah perangkat bahan bakar	193	257
- Panjang efektif	3,7 m	3,7
- Kapasitas bahan bakar	89 MTU	120 MTU
● Jumlah batang kendali	53	77
● Bejana reaktor		
- Diameter dalam	± 4,4 m	± 5,2 m
- Tinggi	± 12,9 m	± 13,6 m
● Tipe pembangkit uap	52 F	70 F - 1
● Pompa pendingin primer		
- Bentuk	93 A - 1	100 A
- Laju alir (m <sup>3</sup> / jam / loop)	± 2,0 x 10 <sup>4</sup>	± 2,6 x 10 <sup>4</sup>
● Tipe turbin	TC6F44	TC6F52
● Tipe bejana pengungkung reaktor	PCCV	PCCV
● Sistem keselamatan teknik	Struktur 2 sistem	Struktur 4 sistem
● Jalur air penggantian bahan bakar	Di luar bejana pengungkung	Di dalam bejana pengungkung
● Sistem pencatat reaktor	Analog	Digital

Sumber: <http://hrcst-ats.jst.go.jp/images/02/02-01-01-02/01.gif>

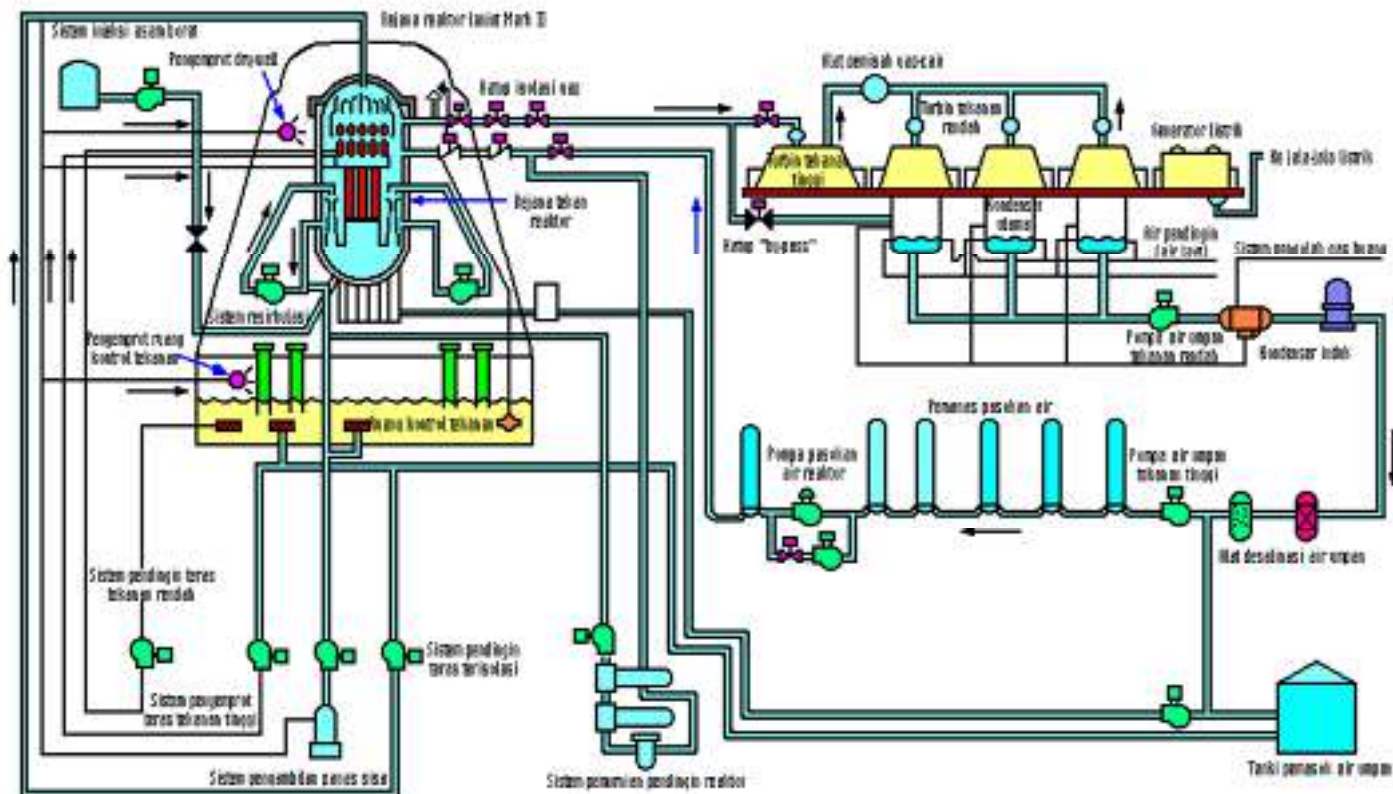
# Topologi Untai Sistem Primer PLTN VVER



# Bangunan Sungkup PLTN PWR (AP1000)

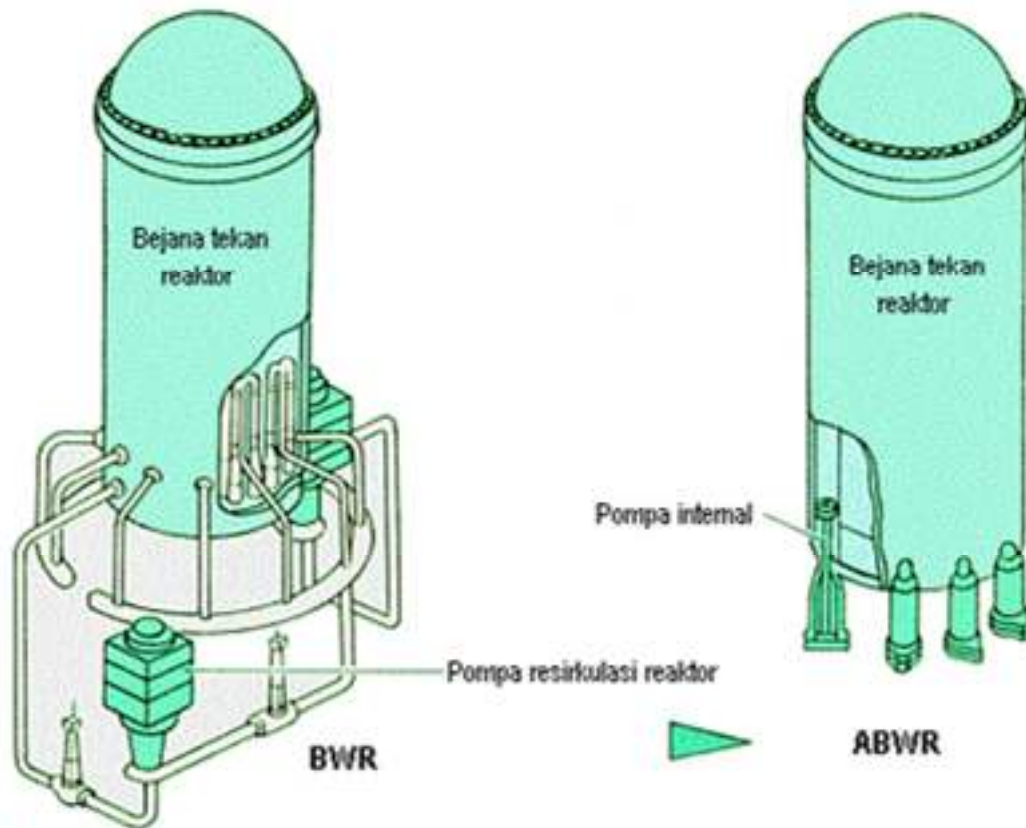


# Sistem Pendingin PLTN BWR

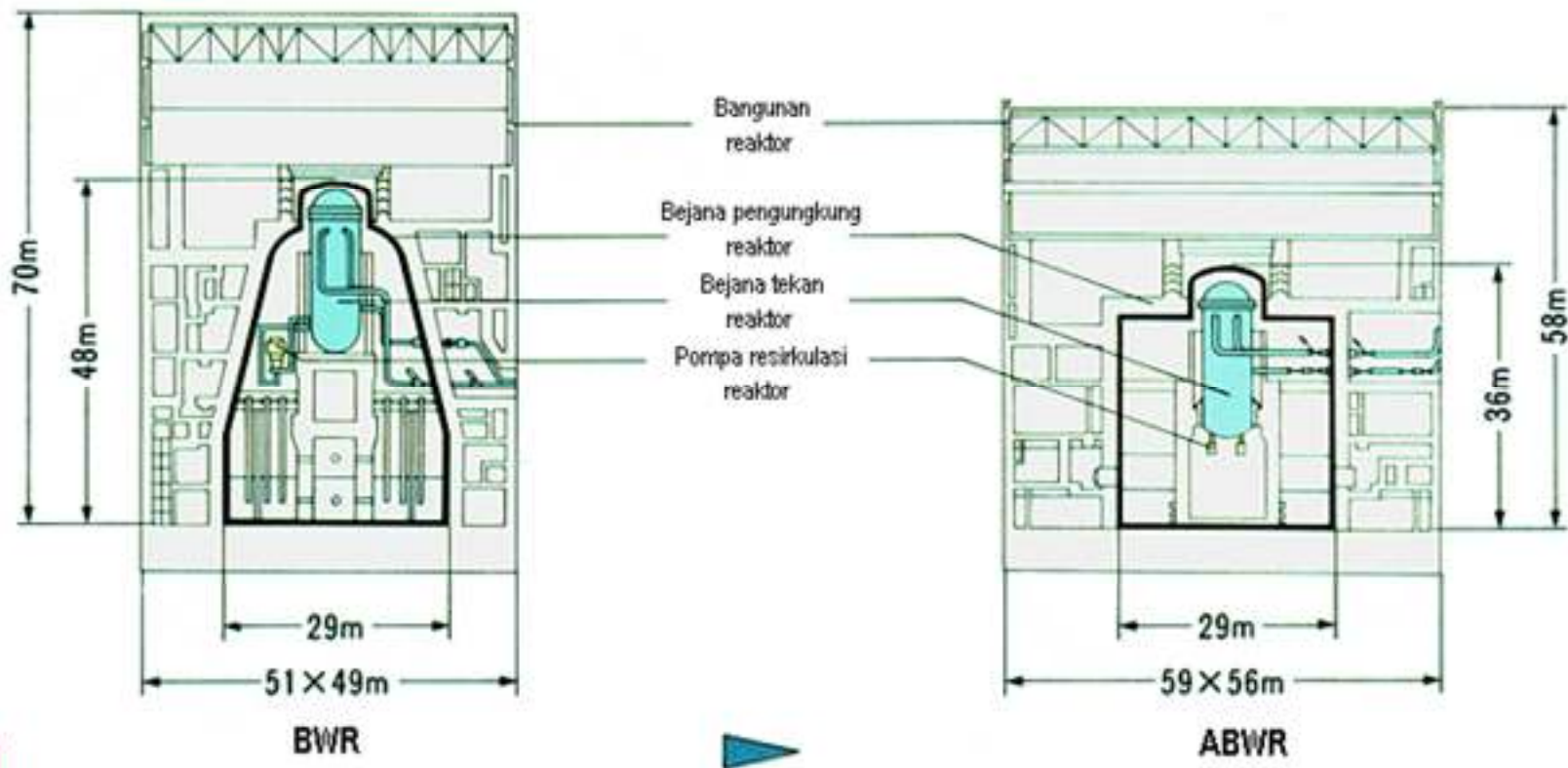




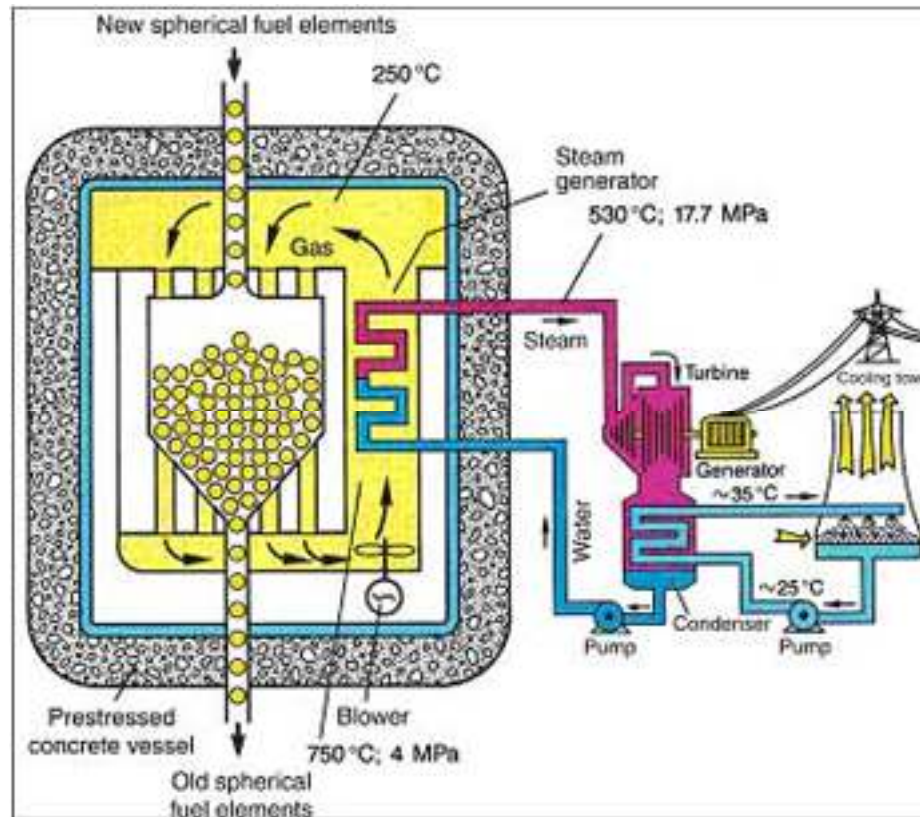
# Topologi Untai Sistem Pendingin PLTN BWR



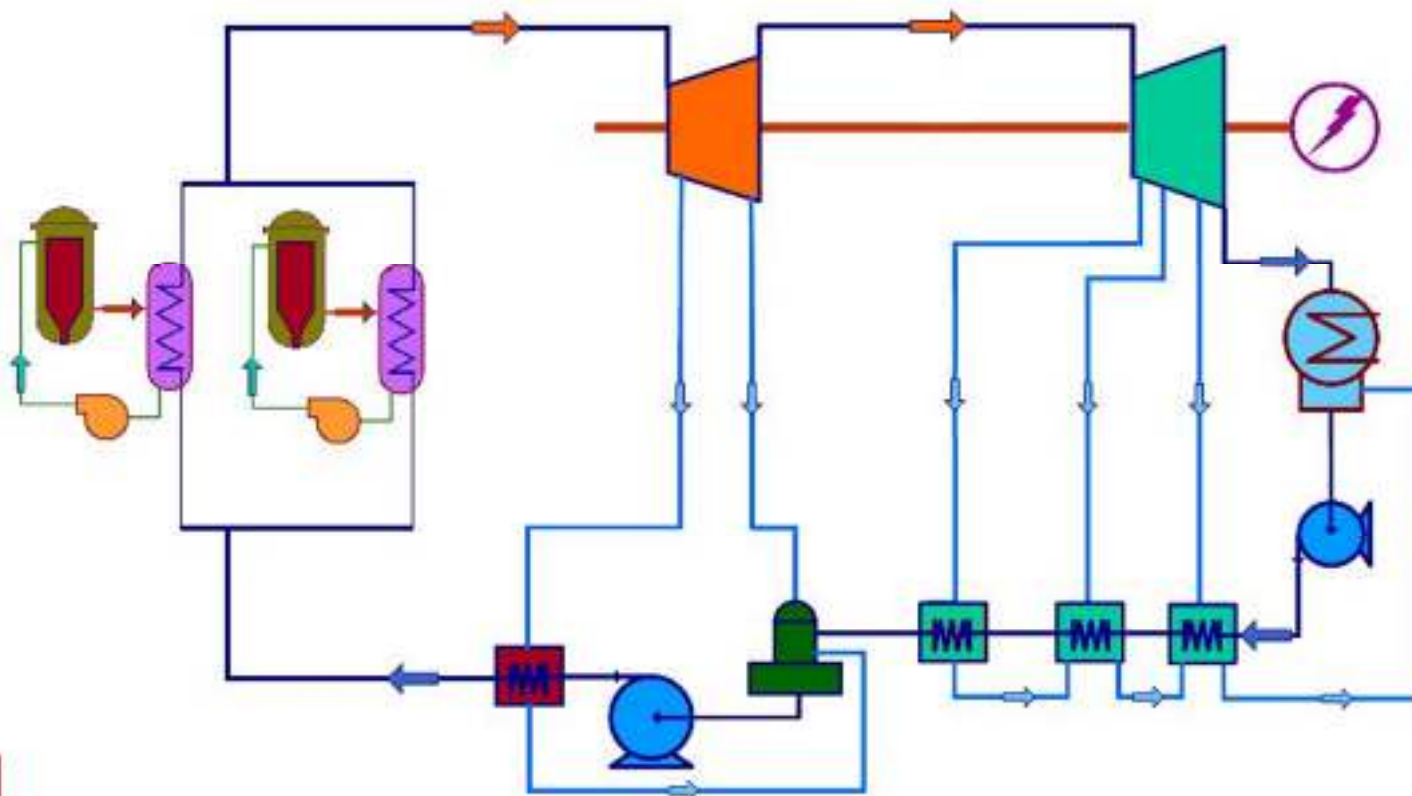
# Bangunan Sungkup PLTN BWR



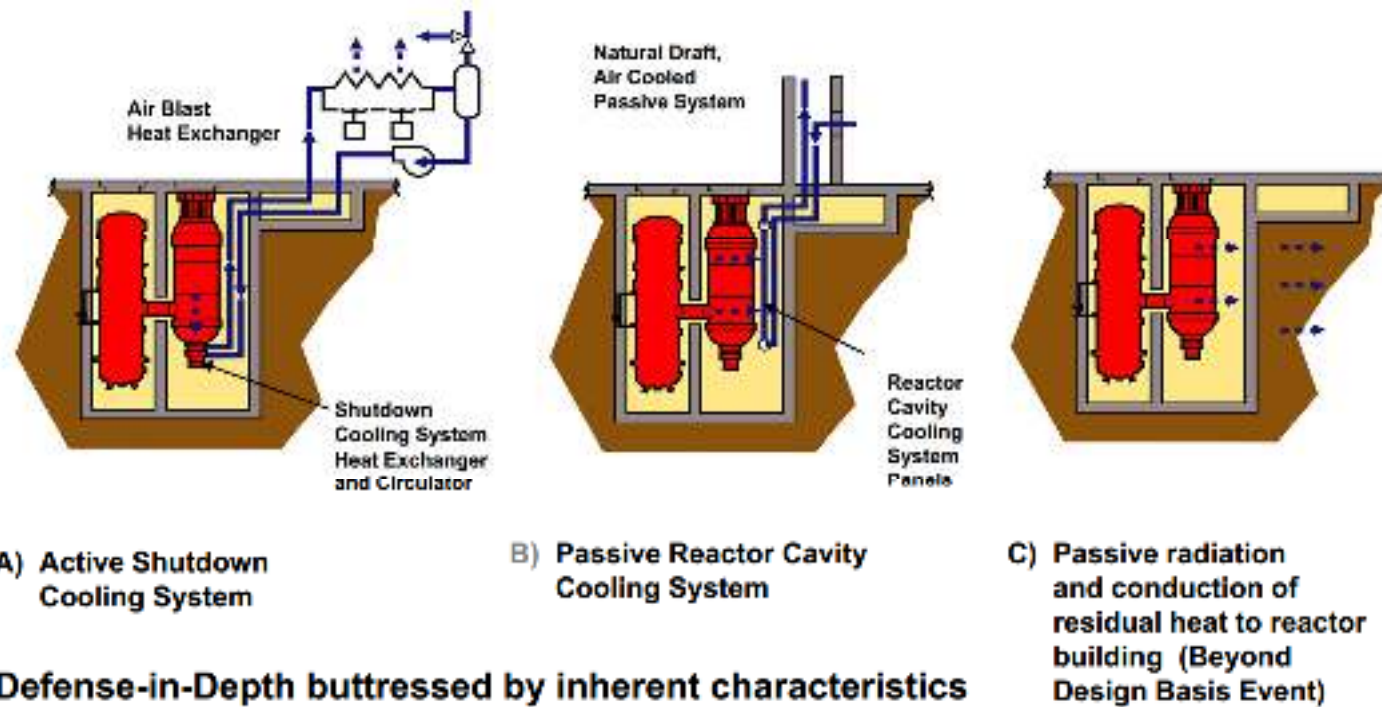
# Sistem Untai Pendingin PLTN RGTT (HTGR Bola)



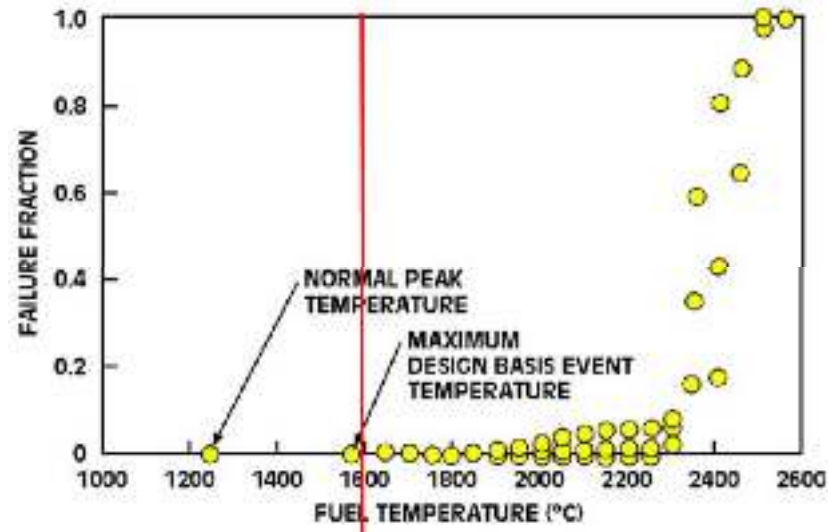
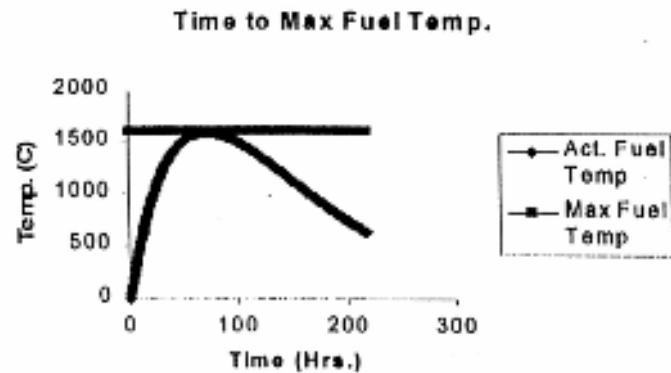
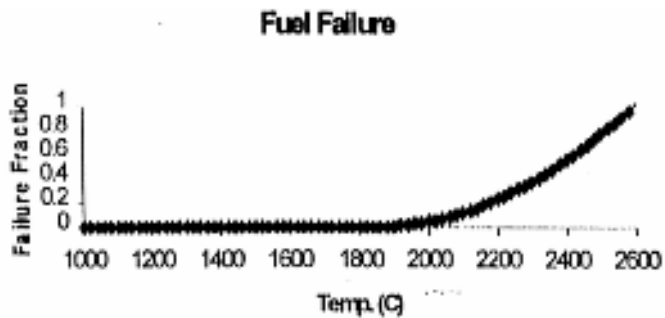
# Sistem Untai Pendingin HTR-PM 250 MWt



# Konsep Desain Keselamatan Sistem PLTN-RGTT

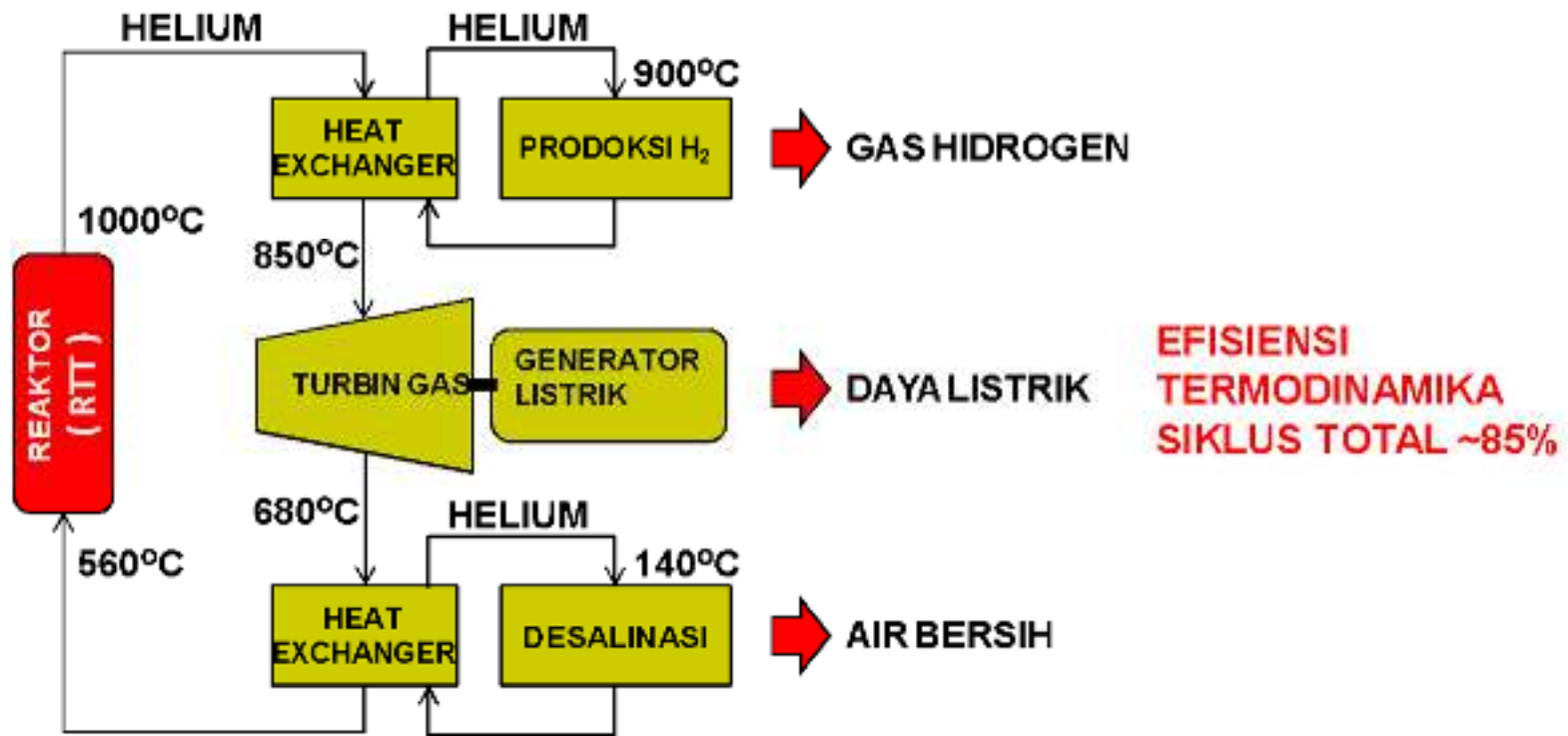


# Keselamatan Utama Sistem PLTN-RGTT



- Kondisi kecelakaan:
- Semua sistem pendingin mati
  - Semua elemen kendali di luar teras
  - Tak ada pendingin darurat
  - Tak ada campur tangan operator

# Aplikasi PLTN RGTT/HTGR Kogenerasi

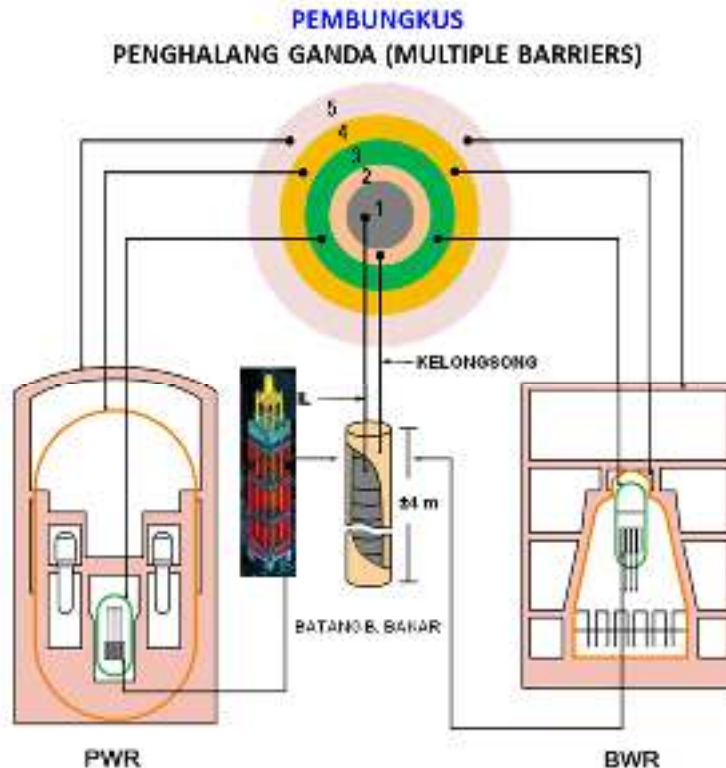


# Konsep Desain Keselamatan PLTN



# Prinsip Keselamatan Sistem PLTN

Bungkus rapat dan jaga keutuhan pembungkusnya



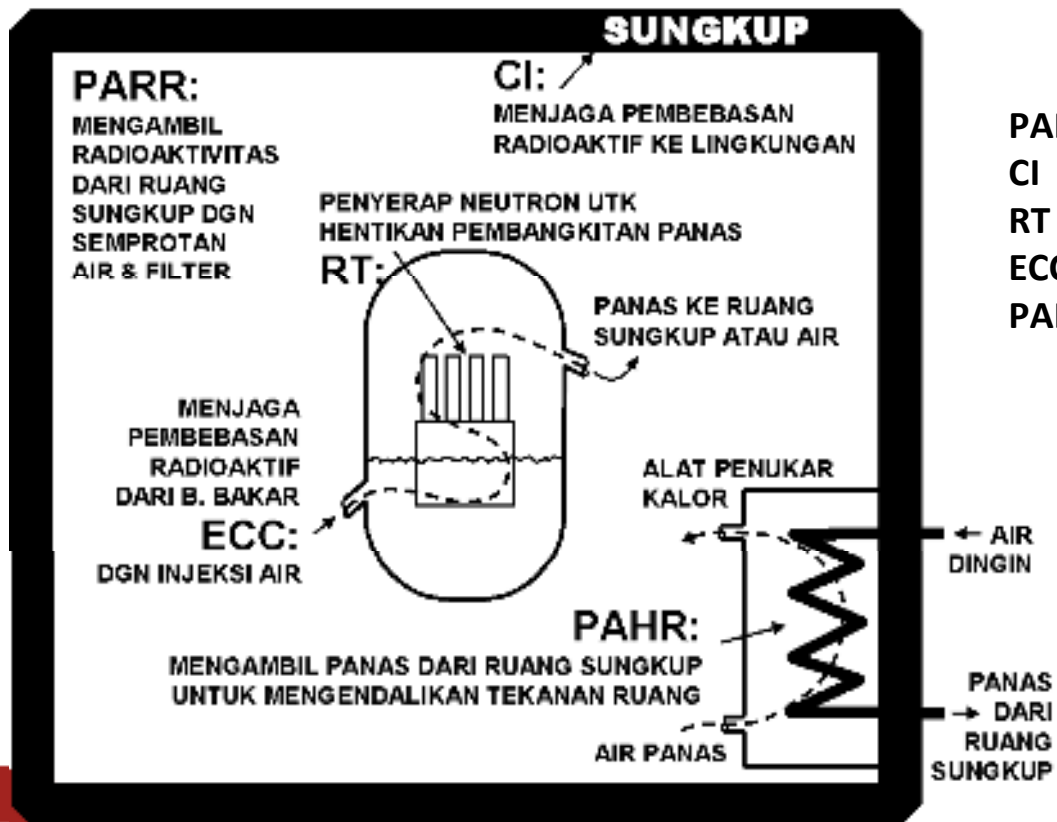
**PENJAGAAN KEUTUHAN BUNGKUS**  
**PERTAHANAN BERLAPIS**  
**(DEFENSE IN DEPTH) :**

- **LAPIS 1: PENCEGAHAN**
  - ☑ Desain dan pengawasan
- **LAPIS 2: PROTEKSI**
  - ☑ Penjagaan dan pembatasan
- **LAPIS 3: MITIGASI**
  - ☑ Mitigasi kecelakaan dengan **Fitur Keselamatan Teknis**
- **LAPIS 4: PENANGANAN**
  - ☑ Pengelolaan resiko kecelakaan
  - ☑ Pengelolaan resiko paska kecelakaan

# Konsep Pertahanan Berlapis (*Defense in Depth*)

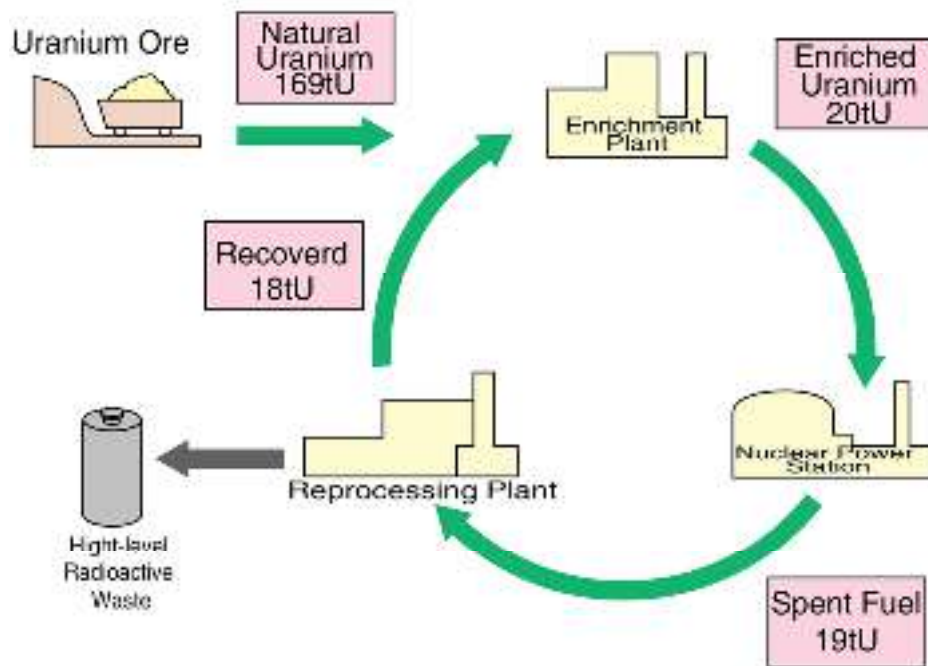
Tingkatan pertahanan berlapis	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	
<b>Kondisi operasi</b>	Operasi normal	Kejadian operasional terantisipasi	Kecelakaan dasar desain	Melampaui kecelakaan dasar desain Kecelakaan parah	Pasca kecelakaan parah
<b>Fitur esensial sistem</b>	Desain konservatif, kualitas dalam konstruksi dan operasi	Pengendalian, sistem proteksi dan pembatas & fitur pengawasan lain	Fitur keselamatan teknis dan prosedur kecelakaan	Tindakan pelengkap, manajemen kecelakaan termasuk proteksi thd pengungkung	Tanggap kedaruratan di luar tapak
<b>Tujuan</b>	Mencegah operasi tak normal dan kegagalan	Mengendalikan operasi tak normal, deteksi kegagalan	Mengendalikan kecelakaan agar tetap di bawah level parah postulasi dalam dasar desain	Mengendalikan kondisi yang parah, menghambat kecelakaan berlanjut, mitigasi konsekuensi kecelakaan parah, proteksi pengungkung	Mitigasi konsekuensi radiologi akibat pembebasan zat radioaktif tertentu yang penting

# Fitur Keselamatan Teknis (*Engineering Safety Feature*)



- PARR** : Post Accident Radiation Removal
- CI** : Containment Integrity
- RT** : Reactor Trip
- ECC** : Emergency Core Cooling
- PAHR** : Post Accident Heat Removal

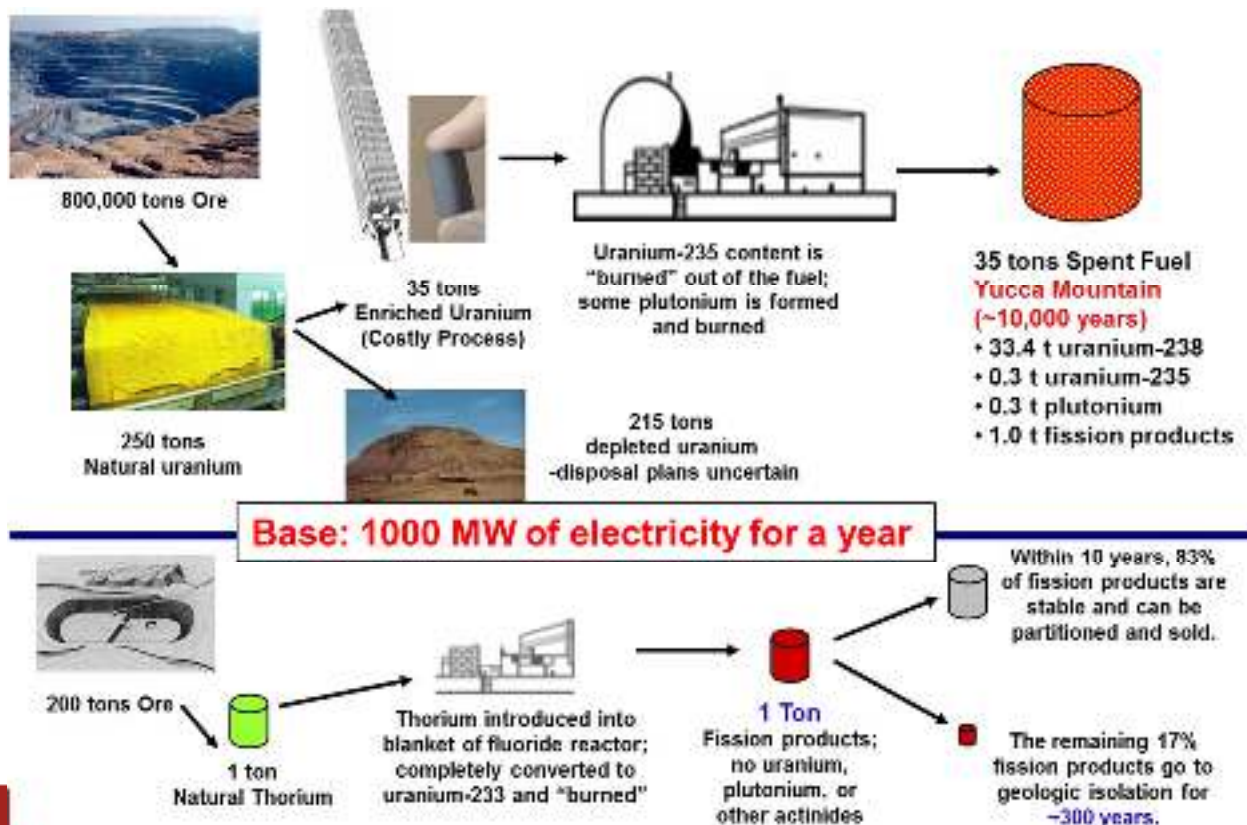
# Daur Bahan Bakar Nuklir



Source : Japan Atomic Industrial Forum, Inc. : Nuclear Power Handbook,2001

Daur bahan bakar PLTN PWR 1000 MWe selama 1 tahun

# Daur Bahan Bakar Uranium vs Thorium



# Perkembangan Teknologi PLTN

# Evolusi Teknologi PLTN



- Tahapan Desain PLTN
  - Purwarupa / *Prototipe*
  - *Demonstration plant*
  - Commercial plant
- 1<sup>st</sup> Comm Plant
  - Gen-III: **ABWR (1996)**
  - Gen-III+: **VVER 1200/392M (2016)**
- 1<sup>st</sup> Demo Plant
  - SMR: **FNPP KLT-40S (2019)**
  - Gen-IV: **VHTR HTR-PM (2021)**

# PLTN Generasi III+

Rancangan reaktor Gen-III+ merupakan pengembangan evolusioner reaktor Gen-III, dengan menawarkan **peningkatan keselamatan signifikan** dibandingkan rancangan reaktor Gen-III yang disertifikasi oleh US-NRC pada 1990-an. Sertifikasi desain Gen-III+ merujuk regulasi NRC, sesuai dengan pasal 10 CFR Part 52.<sup>[5]</sup>

→ **Certified: PWR, PHWR, BWR**



## Satus Pembangunan/COD PLTN PWR Generasi III+

- **VVER-1200/392M**, OKB Hidropress, 1180 MWe, **COD 2016**, Novovoronezh-Rusia
- **VVER 1200/491**, OKB Hidropress, 1199 MWe, **COD 2018**, Leningrad-II-Rusia
- **VVER 1200/509**, OKB Hidropress, 1200 MWe, **Dibangun**, Akkuyu-Turkiye
- **VVER 1200/523**, OKB Hidropress, 1200 MWe, **Dibangun**, Roopur-Bangladesh
- **VVER 1200/513**, OKB Hidropress, 1200 MWe, **Dibangun**, Akuyu-Turkiye
- **VVER 1300/510**, OKB Hidropress, 1255 MWe, **Dibangun**, Kursk-Rusia
- **AP-1000**, Westinghouse-Toshiba, 1250 MWe, **COD 2018**, Sanmen-China
- **CAP-1400**, SNPTC-Westinghouse, 1500 MWe, **Dibangun**, Shidao Bay-China
- **EPR**, Areva, 1750 MWe, **COD 2018**, Taishan-China



# Peningkatan Keselamatan PLTN Gen-III+

- **Desain Pasif:** Sistem keselamatan beroperasi tanpa memerlukan intervensi manusia atau daya listrik eksternal. Sistem pendingin pasif yang beroperasi berdasarkan prinsip aliran gravitasi atau konveksi alami. Hal ini menghilangkan ketergantungan pada sumber daya eksternal dan memastikan pendinginan yang efektif bahkan tanpa listrik.
- **Sistem Penghalang Ganda:** Mencegah pelepasan radioaktif yang tidak terkontrol.
- **Keamanan Terhadap Kecelakaan:** PLTN Gen III+ dirancang untuk mengatasi berbagai skenario kecelakaan, termasuk gempa bumi, badai, dan lainnya.
- **PLTN Generasi III+ dirancang sebagai reaktor terpadu yang menggabungkan pembangkit listrik, sistem pendingin, dan sistem pengamanan yang terintegrasi dengan lebih baik.**
- **Penggunaan Bahan Bakar yang Lebih Efisien**
- **Peningkatan Pengawasan dan Pengendalian dengan sistem pengawasan dan pengendalian yang lebih canggih, menggunakan teknologi informasi dan sensor terbaru.**
- **Peningkatan Pengelolaan Limbah Radioaktif:** PLTN Generasi III+ berusaha untuk meningkatkan pengelolaan limbah radioaktif dengan teknologi pemrosesan dan penyimpanan yang lebih efisien dan aman.

# Pelajaran Dari Kecelakaan Fukushima

- Fungsi keselamatan dasar harus tetap berfungsi dalam semua kondisi
  - **Kontrol reaktivitas** untuk memadamkan reaksi fisi
  - **Pengambilan energi panas** dari reaktor ke *ultimate heat sink*
  - **Pengungkungan zat radioaktif** agar jangan tersebar ke lingkungan
- Sistem yang menjalankan fungsi keselamatan harus dijaga efektivitasnya agar tidak terpengaruh oleh kondisi bencana baik dari dalam maupun dari luar
- Sungkup (*containment*) harus dijaga dan dilindungi efektivitasnya sehingga tetap mampu menahan zat radioaktif dalam jumlah besar



Terima kasih atas perhatian Anda