



# NUCLEAR FUEL CYCLE (DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR)

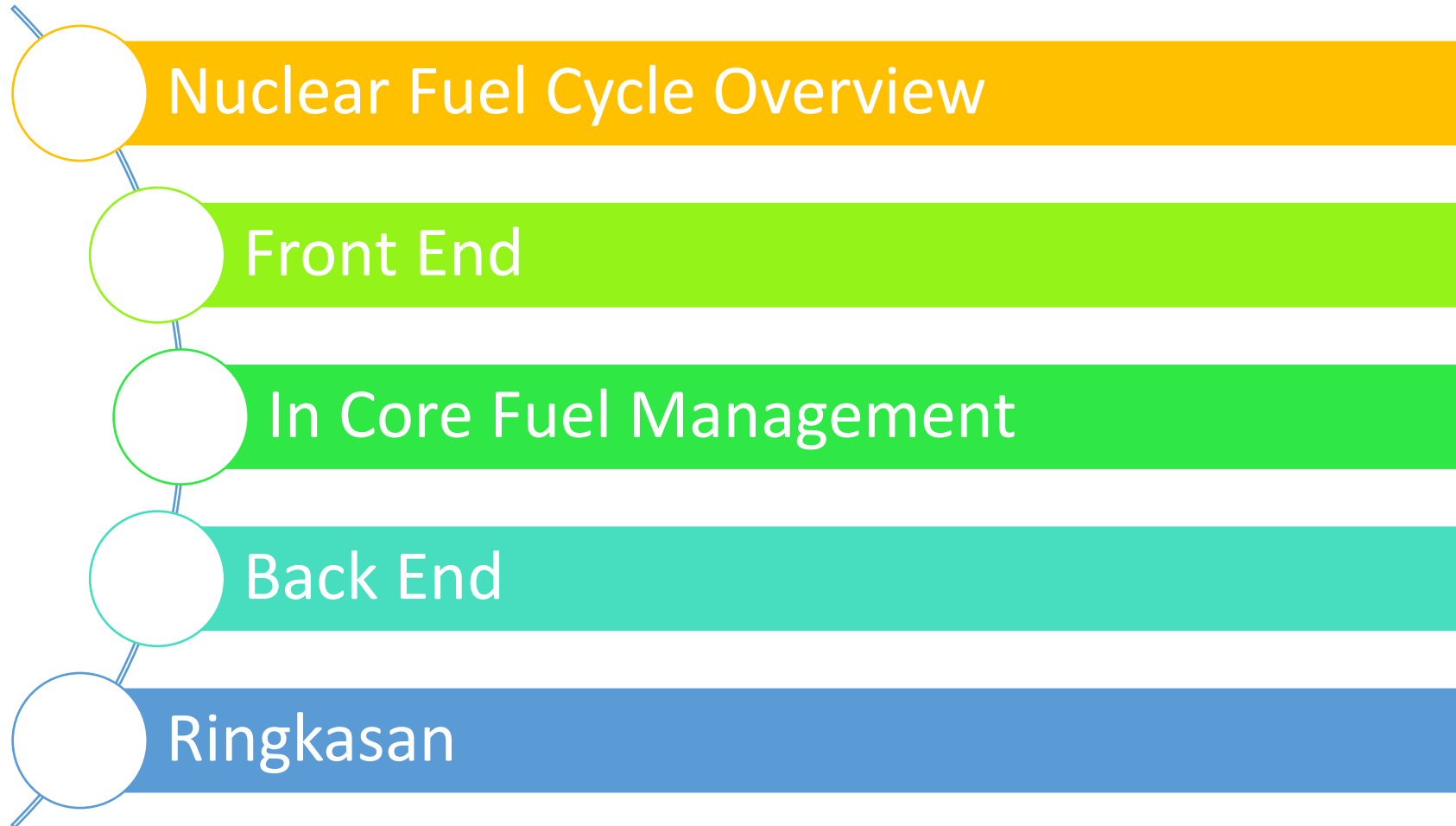
Ganisa Kurniati Suryaman

Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif

FTC Reactor Engineering  
Serpong, 18 Februari 2025  
KST BJ.Habibie Gedung 124



# OUTLINE



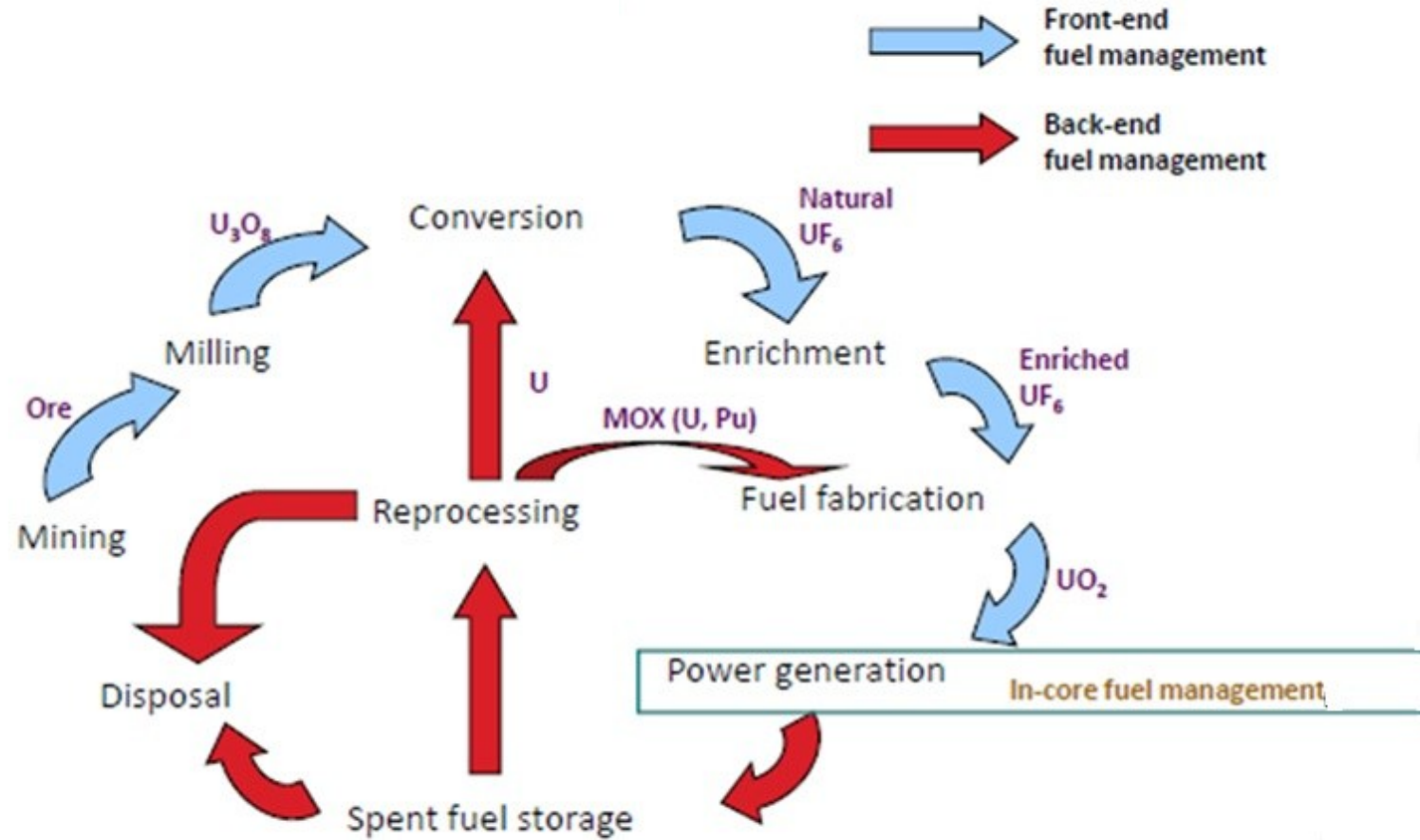
# NUCLEAR FUEL CYCLE OVERVIEW

Definisi: aktivitas/Langkah-Langkah fisika maupun kimia yang terkait secara langsung dengan pembangkitan daya pada reaktor nuklir.

Dapat diklasifikasi menjadi 3 kategori

- **Front end fuel management**  
meliputi milling, konversi ke uranium heksafluorida, pengkayaan isotop fisil U-235, fabrikasi menjadi elemen dan perangkat bahan bakar
- **In-core fuel management**  
meliputi iradiasi bahan bakar di reaktor
- **Back-end fuel management**
  - Meliputi penyimpanan dan pengiriman bahan bakar sisa, pengolahan ulang bahan bakar sisa untuk mengambil produk fisi dan memisahkan elemen transurium dan penyimpanan limbah.

# NUCLEAR FUEL CYCLE OVERVIEW



# AKTIVITAS FRONT-END

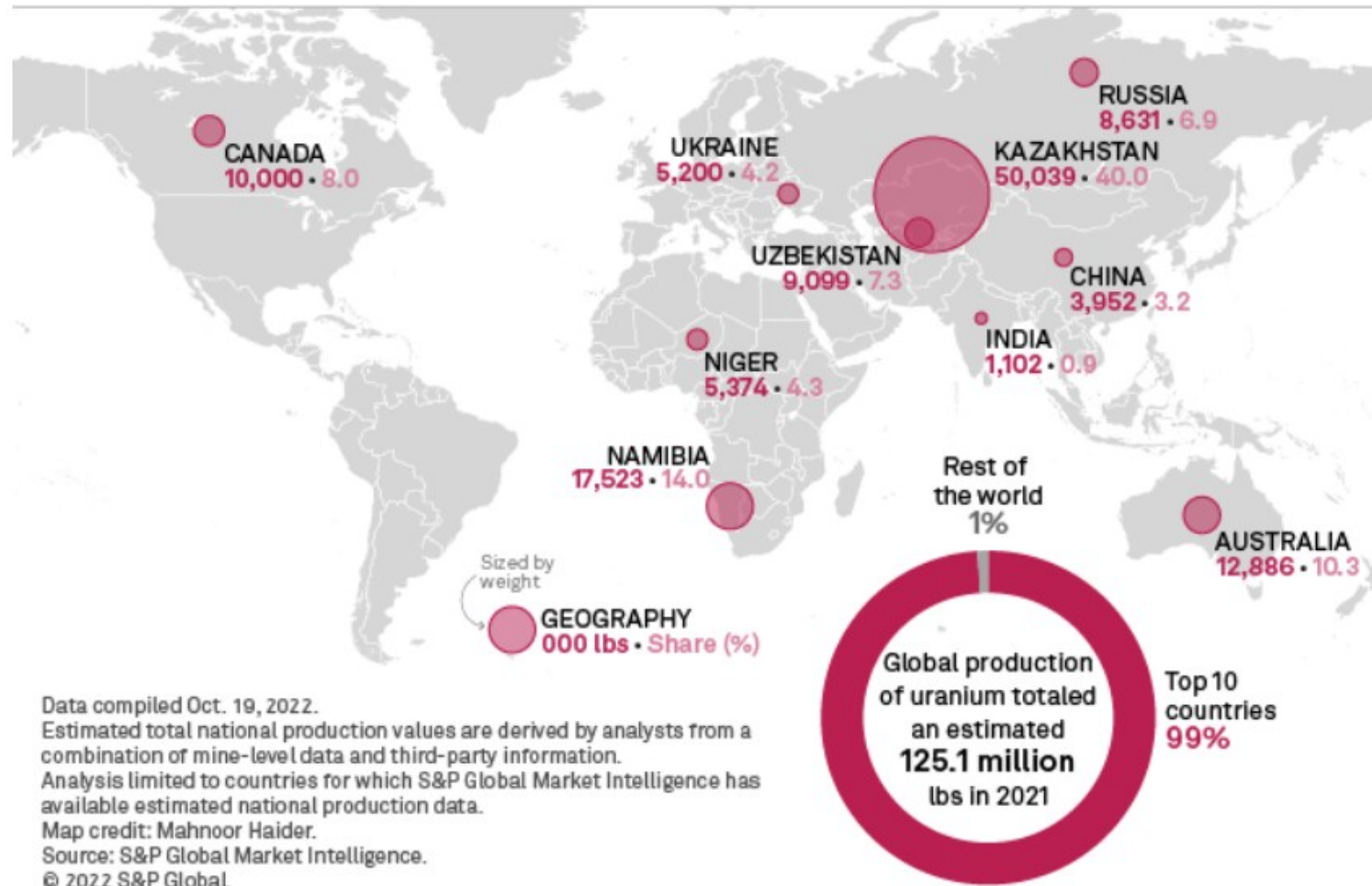
# MINING - URANIUM

- Ditemukan tahun 1789 oleh ahli kimia Jerman yg bernama Martin Klaproth
- Ditemukan di alam, sebagian besar dalam bentuk batuan, terdapat pula di air laut
- Sifat: Densitas tinggi (19.050 kg/m<sup>3</sup>), temperatur leleh: 1132,2 C
- Isotop di alam: U-234, U-235, U-238



# MINING – Tambang Uranium

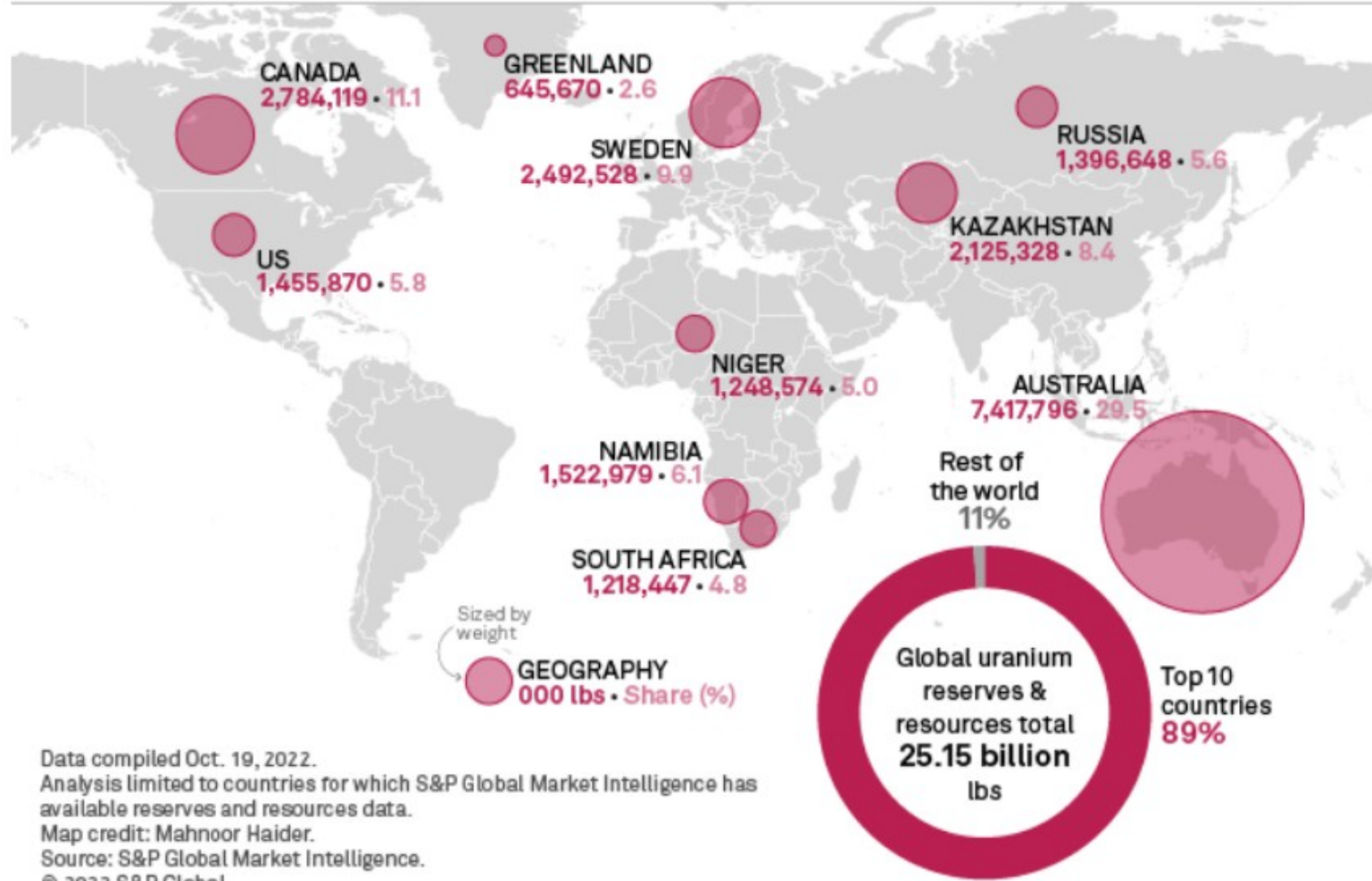
Top 10 countries by estimated national production of uranium in 2021





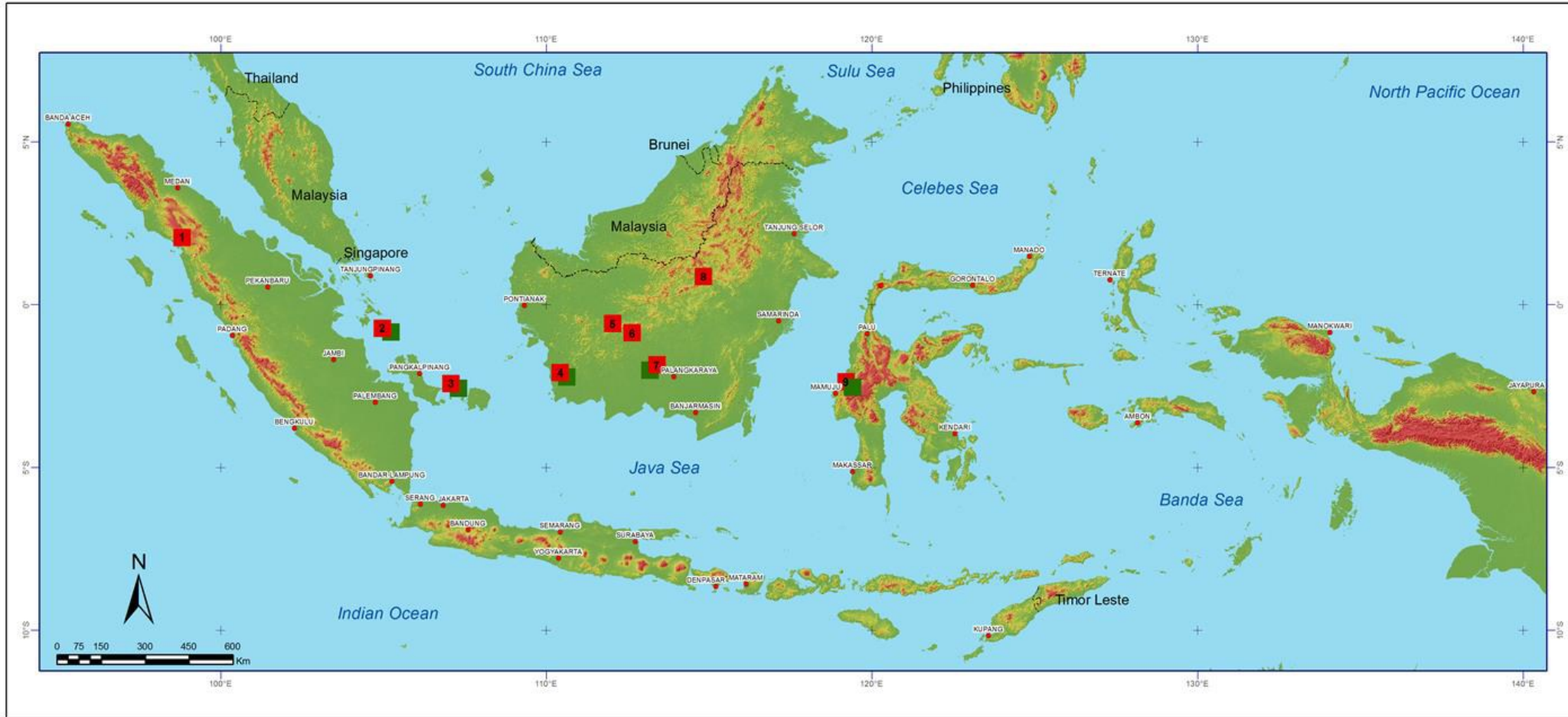
# MINING

## Top 10 countries by total uranium reserves & resources





# MINING- Potensi Mineral Radioaktif di Indonesia



**Legend**

Towns

**Deposits**

- Uranium
- Thorium

1. Aloban, Sibolga - North Sumatra
2. Singkep - Riau Islands
3. Bangka Belitung Islands
4. Ketapang - West Kalimantan

5. Kalan, Melawi - West Kalimantan
6. Mentawa and Darab, Seruyan - Central Kalimantan
7. Katingan - Central Kalimantan
8. Kawat, Mahakam Hulu - East Kalimantan
9. Mamuju - West Sulawesi

Sumber: Laporan Teknik Sumberdaya Bahan Galian Nuklir, 2018

# MINING- Metode Penambangan Uranium

## 1. Open Pit Mining

- Untuk deposit yang dangkal
  - Luas wilayah eksplorasi yang besar dengan pengambilan material yang banyak.
- + **Cost Effective:** secara umum lebih ekonomis karena metoda yang digunakan sangat sederhana
- + **Efisien:** high production rates
- ✗ **Dampak Lingkungan:** dampak kerusakan lingkungan sangat besar seperti pengrusakan habitat, kontaminasi groundwater dan limbah batuan yg banyak
- ✗ **Resiko Kesehatan:** debu hasil proses penambangan dapat berbahaya bagi kesehatan



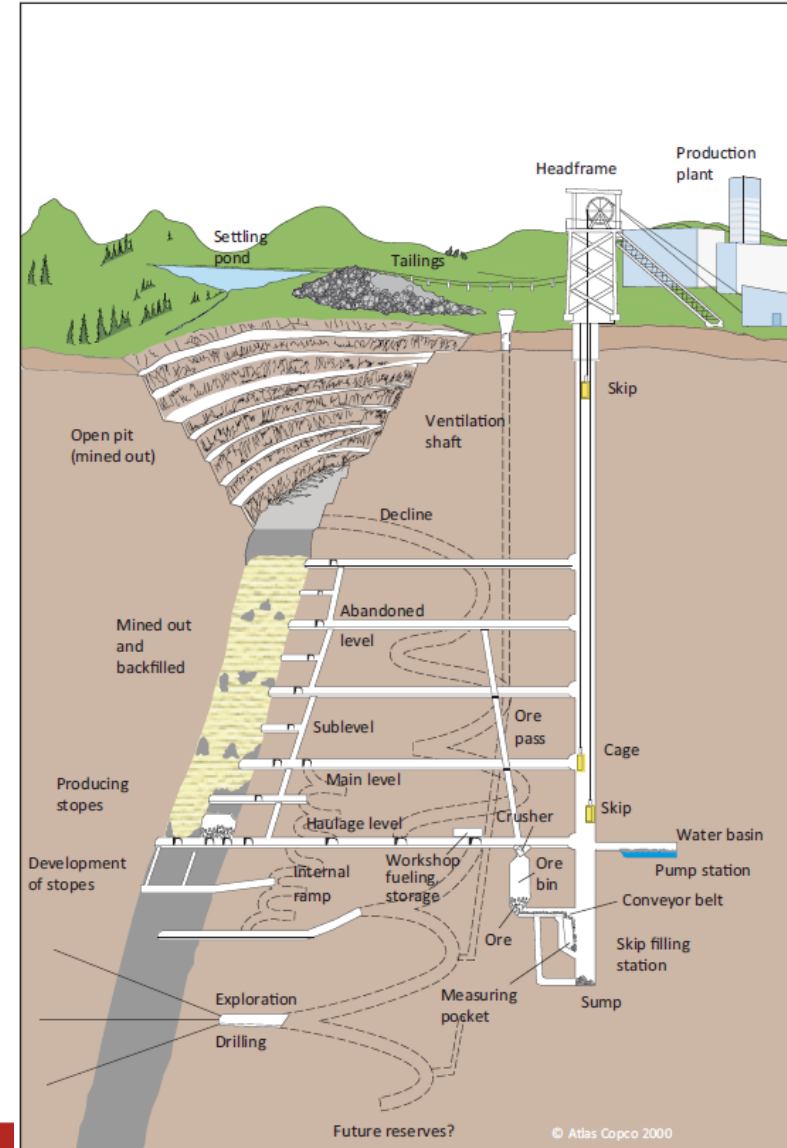
Tambang Uranium di Namibia

Sumber: [Uranium mining - Energy Education](#)

# MINING- Metode Penambangan Uranium

## 2. Underground Mining

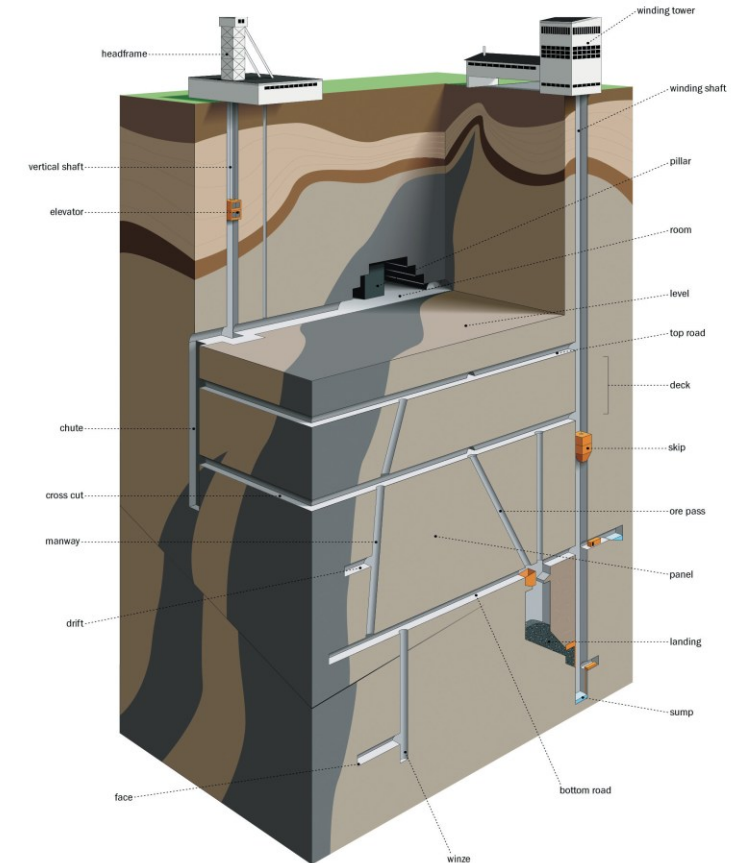
- Bijih terlalu dalam untuk dilakukan eksplorasi dengan metode open pit
- Hanya beberapa lubang di permukaan
- Semua tambang di bawah tanah diberi ventilasi, pada tambang uranium harus ada perhatian ekstra untuk meminimalisir paparan radiasi dan hirupan debu
- Adanya gas radon tingkat tinggi, maka memerlukan ventilasi yang kuat





# MINING- Metode Penambangan Uranium

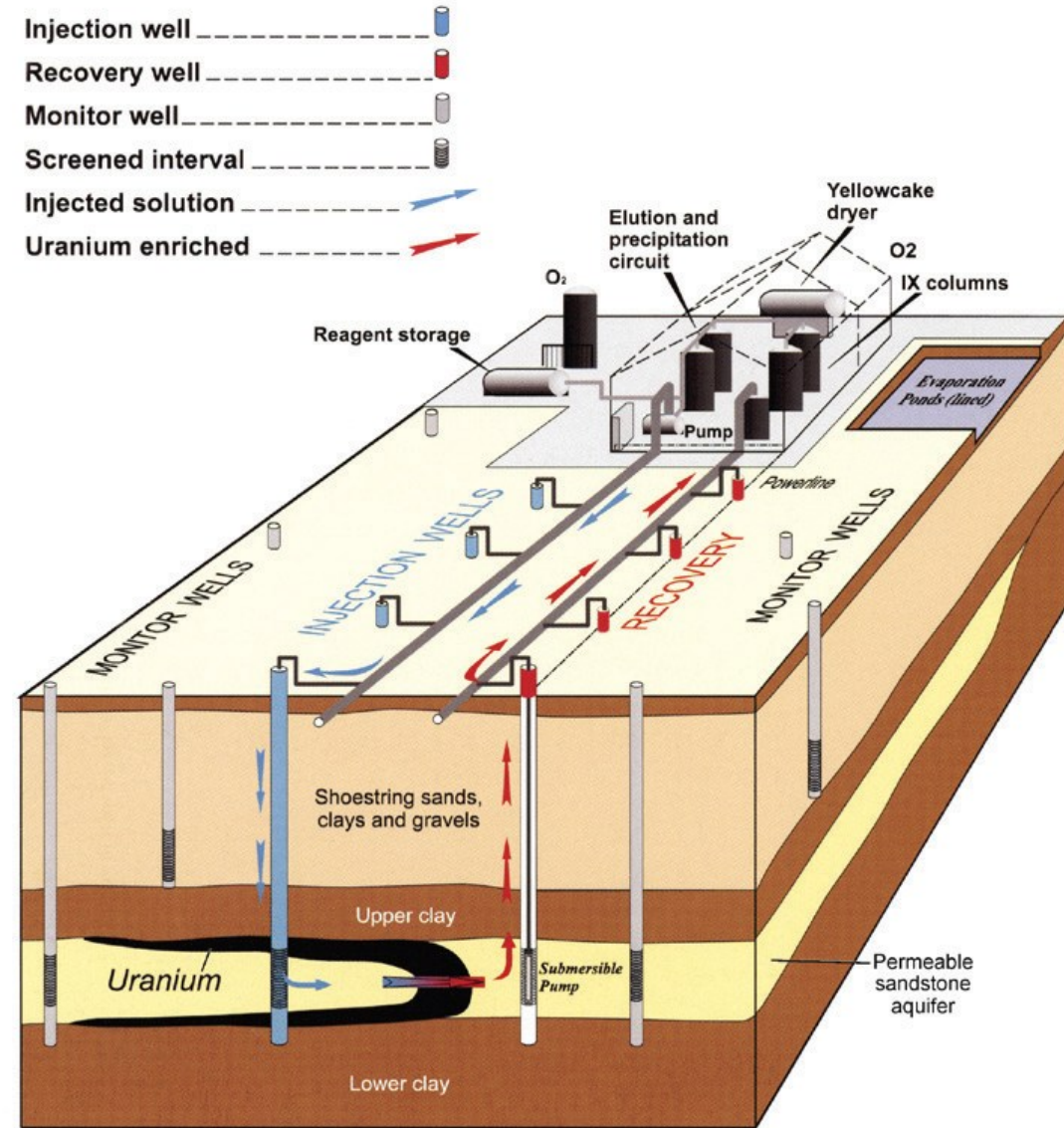
## 2. Underground Mining



Sumber: Committee on Uranium Mining in Virginia. Uranium Mining in Virginia. 2012

### 3. In Situ Leaching (ISL)

- Proses penambangan ramah lingkungan, tidak merusak, gangguan minimal
- Melakukan ekstraksi dari batuan berpori



NOTE: Not to scale - diagrammatic only

### 3. In Situ Leaching (ISL)

- + Dampak lingkungan minimal
- + Biaya rendah
- + Uranium tidak perlu melalui proses milling karena uranium oksida sudah dilindi menjadi bentuk larutan yang kaya uranium
- + Mengurangi potensi bahaya untuk pekerja dari kecelakaan debu dan radiasi
- ✗ Adanya resiko penyebaran cairan lindi di luar deposit uranium termasuk kontaminasi air tanah
- ✗ Dampak yang belum dapat diprediksi akibat cairan pelindi terhadap batuan deposit
- ✗ Adanya resiko penyebaran cairan lindi di luar deposit uranium termasuk kontaminasi air tanah



# Kegiatan Eksplorasi Uranium di Indonesia



Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)



Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)



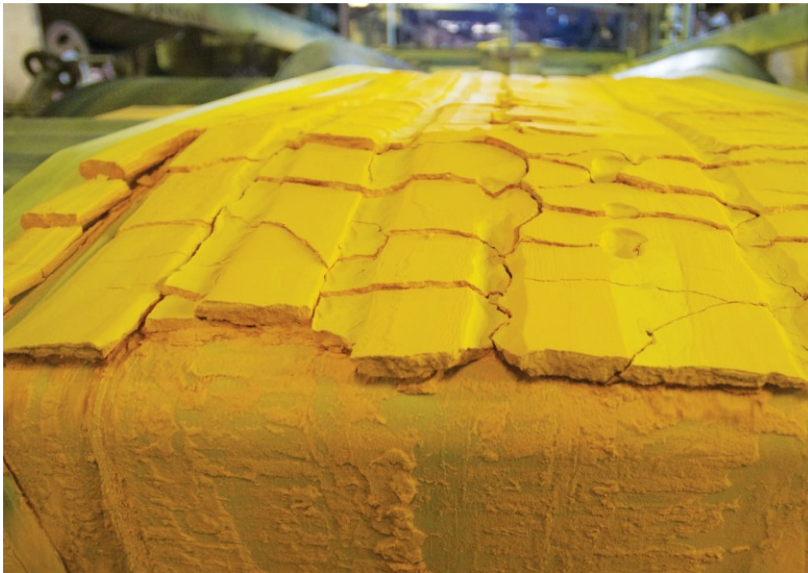
Foto: Dokumentasi PTRGN (2008)

Sumber: Ngadenin dkk, 50 Tahun Eksplorasi Uranium Indonesia, 2022



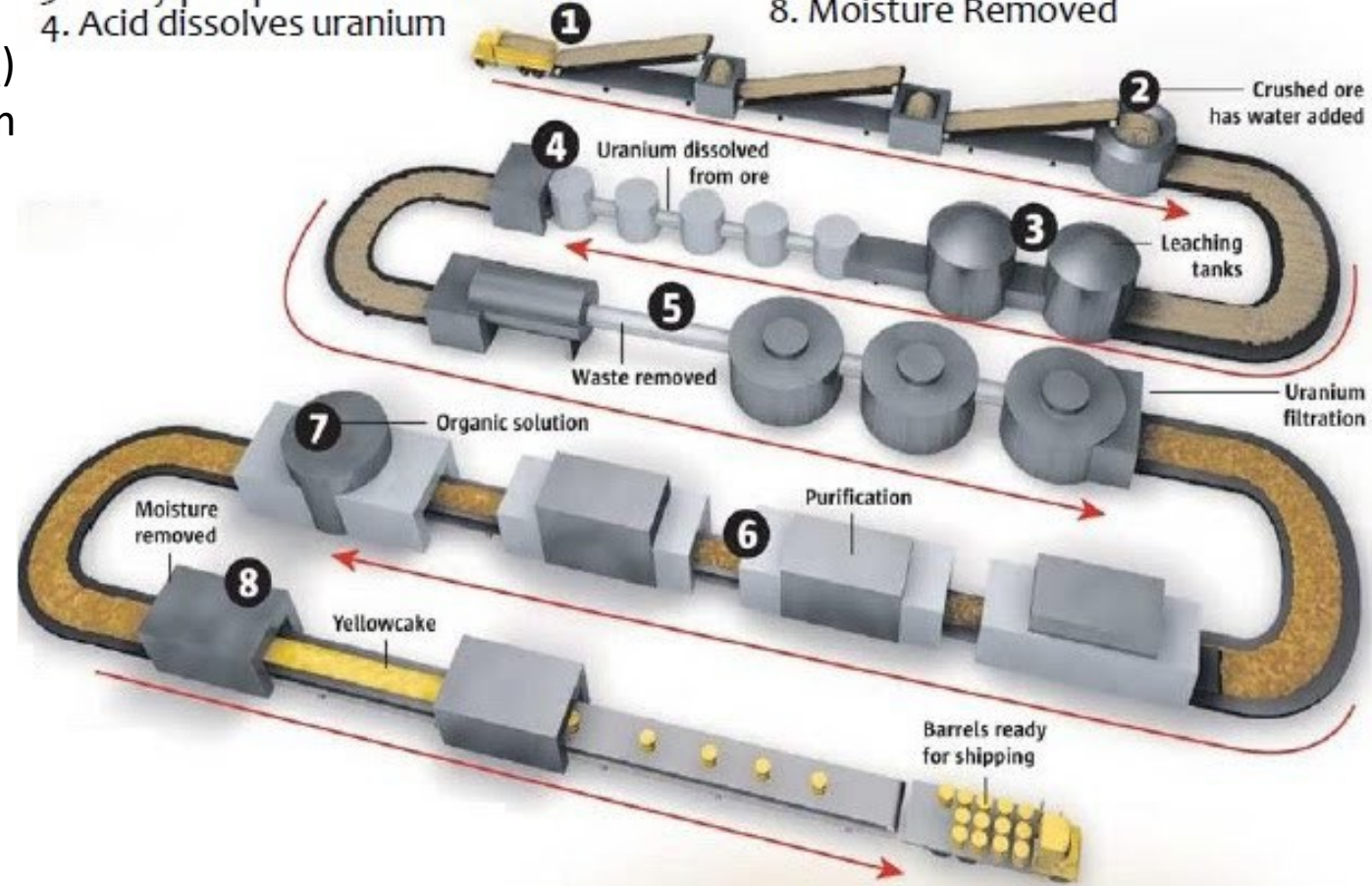
# MILLING

- Milling -> Ekstraksi uranium dari bijih
- Milling menghasilkan konsentrat uranium oksida ( $U_3O_8$ ) dikenal dengan *yellow cake*. Kandungan uranium dalam *yellow cake* >80%



## URANIUM MILLING

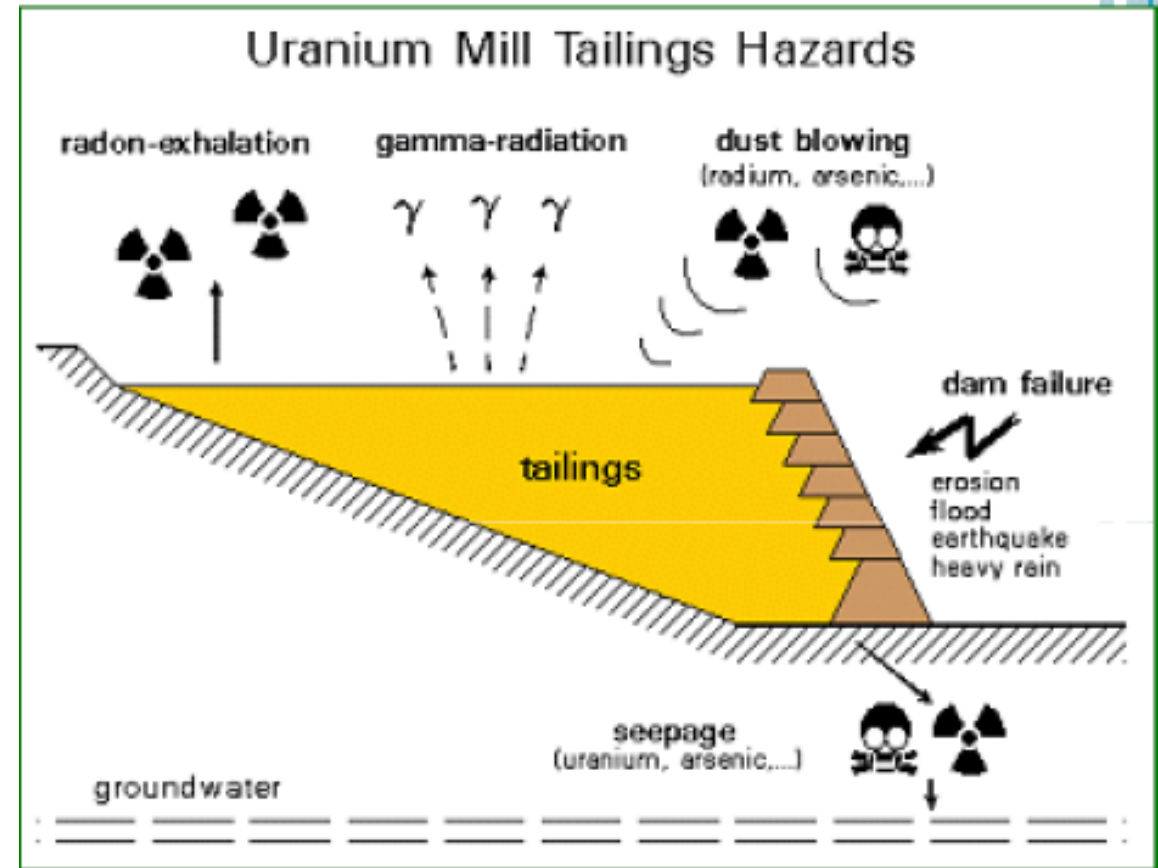
1. Mined ore is crushed
2. Crushed ore ground into fine sand
3. Slurry pumped into leach tanks
4. Acid dissolves uranium
5. Uranium filtered from waste
6. Purified & Concentrated
7. Uranium extraction
8. Moisture Removed



Sumber: [Uranium Milling to Yellowcake to UF6 Conversion – MOUNT EVEREST OF THE OBVIOUS](#)

# MILLING- Mill Tailings

- Mill tailings uranium adalah limbah residu dari bijih yang sudah melalui proses milling yang tertinggal setelah uranium diambil
- Mill tailings uranium dapat memberikan efek Kesehatan public yang kurang baik.
- Empat jalan pemaparan ke publik:
  1. Difusi gas radon secara langsung ke udara dalam ruang.
  2. Gas radon dapat berdifusi dari tumpukan tailing ke atmosfer.
  3. Banyak produk peluruhan radioaktif di tailings menghasilkan radiasi gamma.
  4. Penyebaran tailings oleh angin atau air dapat membawa bahan radioaktif dan bahan toksik lain ke air permukaan atau air tanah.





# Kegiatan Milling di Indonesia



Keterangan: (a) Pencuplikan sampel dengan alat *sample divider*; (b) Pelindian bijih uranium; (c) Pengendapan uranium; dan (d) Pemisahan padat cair dengan *vacuum filter*

Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)



Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)

Kompleks laboratorium percobaan Uranium Skala Pilot di Lemajung

# KONVERSI

## Tujuan:

Yellow cake dikonversi menjadi gas uranium hexafluoride (UF<sub>6</sub>) atau serbuk UO<sub>2</sub> berderajat nuklir

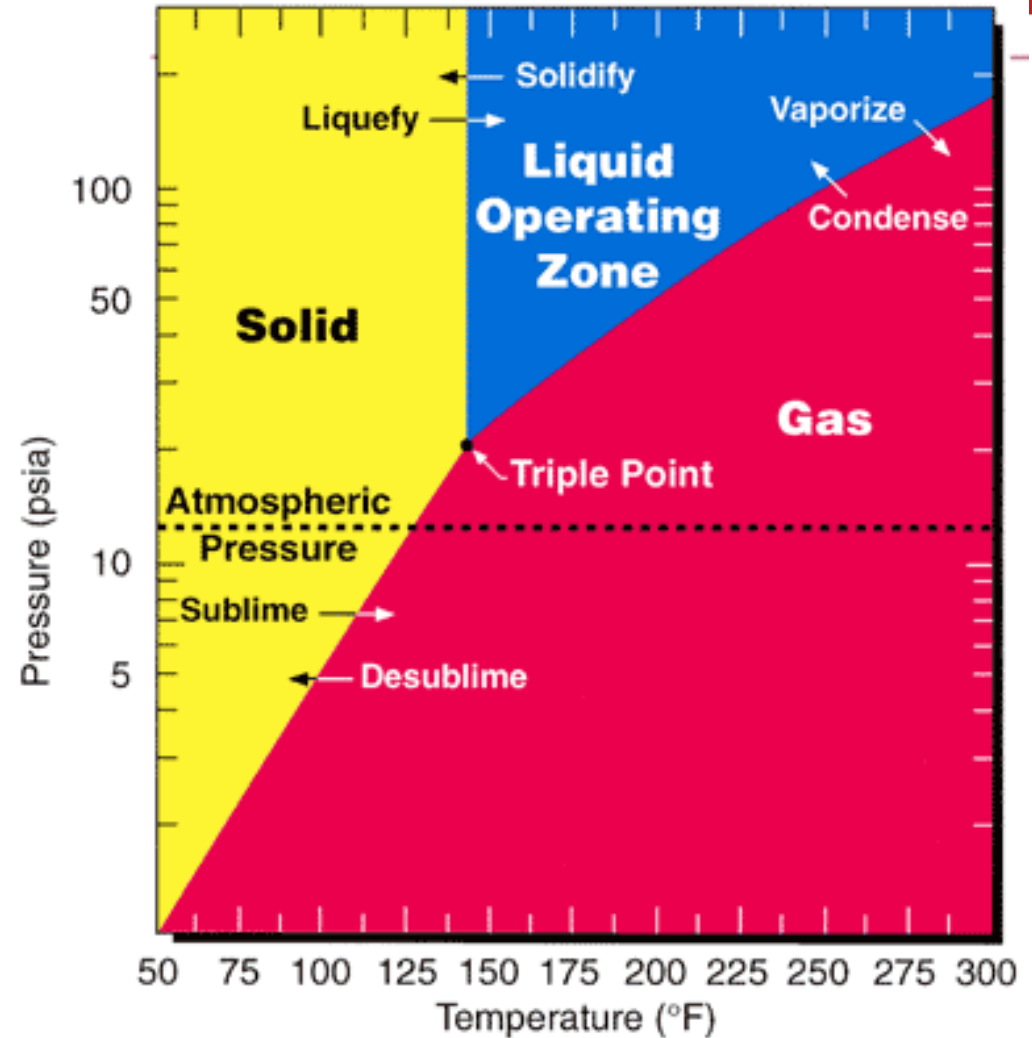
## Uranium Hexafluoride (UF<sub>6</sub>)

- Senyawa yang terdiri dari 1 atom uranium dan 6 atom flourida.
- Bentuk kimia uranium yang digunakan selama proses pengkayaan uranium
- Kristal abu—abu padat pada suhu dan tekanan standar
  - Sangat toksis
  - Sangat reaktif terhadap air
  - Korosif terhadap sebagian besar logam



Kristal UF<sub>6</sub>

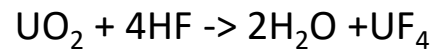
Sumber : Wikipedia



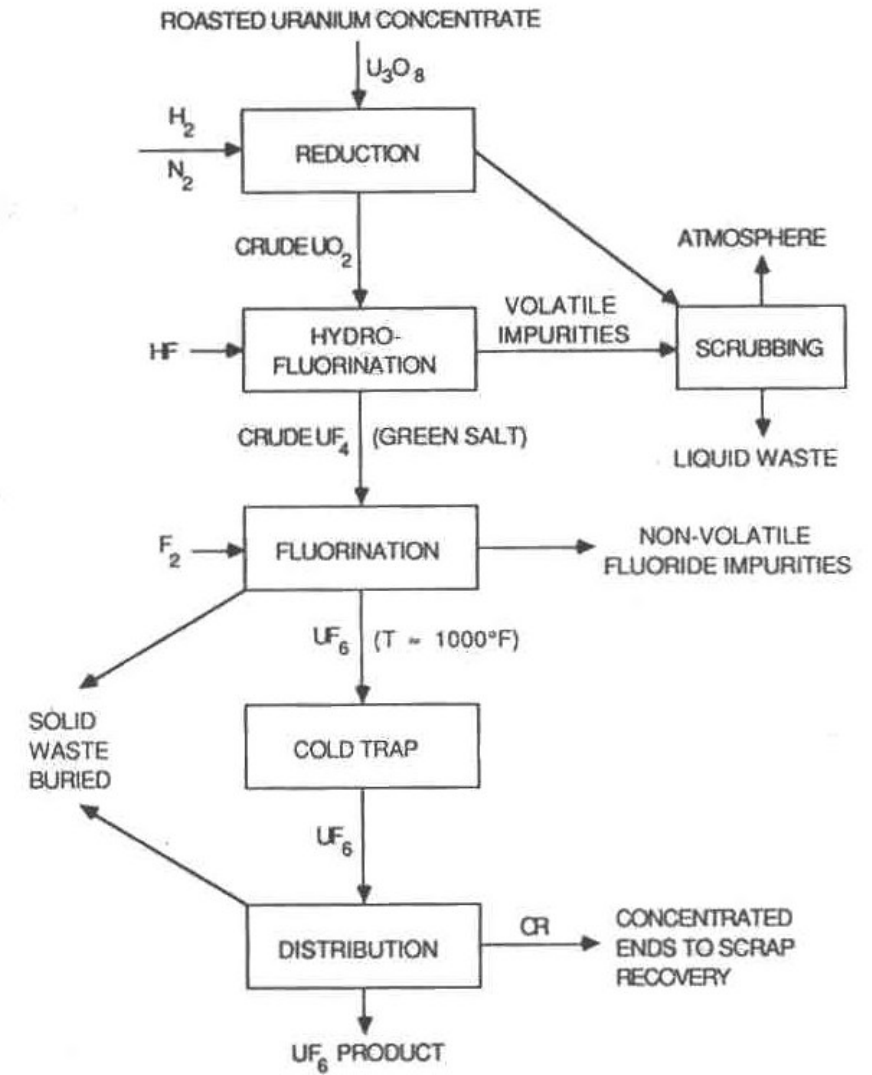
# KONVERSI – Metode Konversi

## 1. Dry Hydrofluoro Process

- $U_3O_8$  digerus menjadi serbuk lembut untuk membuat material umpan yang sesuai untuk Langkah berikutnya
- Material yang digerus kemudian masuk kedalam reaktor fluidisasi dimana material dipertahankan pada suhu 1000 -1200 °F. Produk yang dihasilkan sebagian besar adalah uranium dioksida ( $UO_2$ )
- $UO_2$  yang kasar dilewatkan pada reaktor hydrofluidized dimana terjadi interaksi dengan asam flourida ( $HF$ ) non hidrous pada suhu 900 – 1000 °F. Reaksi kimia yang terjadi



- $UF_4$  diolah pada suhu tinggi dengan gas fluorin,

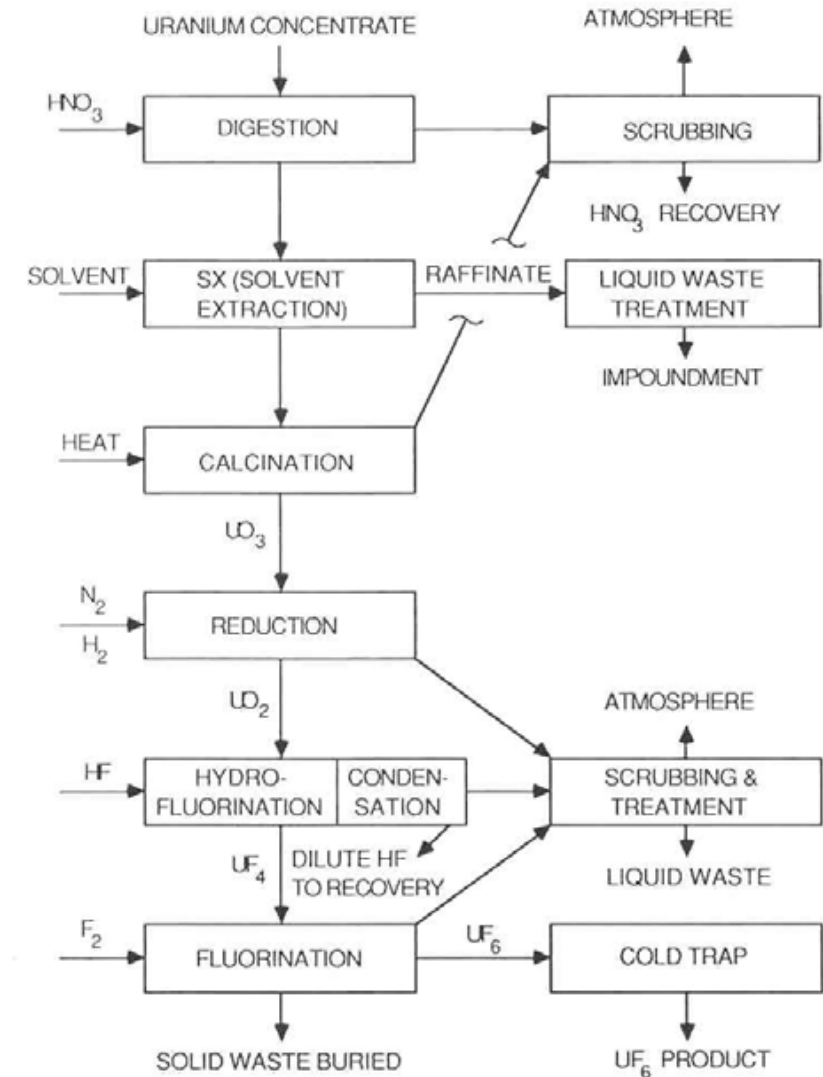




# KONVERSI – Metode Konversi

## 2. Wet Hydrofluoro Process

- Proses mirip dengan dry process
- Pada wet process, yellow cake dilarutkan dalam asam nitrat untuk kemudian dilanjutkan dengan proses ekstraksi solven untuk menghilangkan pengotor.
- Langkah selanjutnya setelah ekstraksi adalah langkah hidrofiorinasi dan flourinasi



# PENINGKATAN

Apakah peningkatan uranium itu?

- Proses-proses kimia yang digunakan untuk meningkatkan presentase U-235
- Untuk light water reactor, proporsi U-235 di bahan bakar adalah 3-5 %
- Untuk senjata nuklir, proporsi U-235 paling sedikit 90%

Dasar peningkatan uranium

- Pemisahan isotop berdasar pada perbedaan massa antara U-235 dan U-238

Separative Work Unit (SWU)

- Merupakan satuan fungsi banyaknya uranium yang diproses dan derajat peningkatan yang dituju dan menyatakan kenaikan konsentrasi isotop U-235 relative terhadap sisa.
- Mengukur kuantitas kerja pemisahan, menggambarkan energi yang dibutuhkan dalam peningkatan, Ketika kuantitas umpan, tail dan produk dinyatakan dalam kilogram.



# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- Thermal diffusion
- Gaseous diffusion
- Gas centrifuge
- Aerodynamic processes
- Electromagnetic isotop separation
- Lain-lain

# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Thermal diffusion**

- **Sejarah**

Sebuah pabrik dioperasikan di Oak Ridge USA untuk memenuhi kebutuhan awal pengkayaan uranium untuk unit difusi gas

- **Kekurangan**

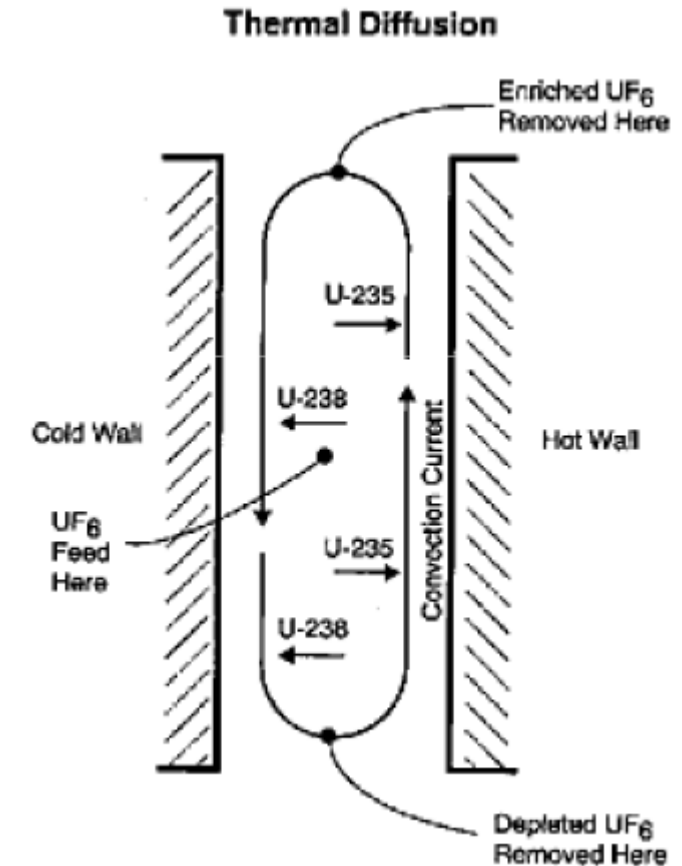
Prosesnya sederhana dan murah tetapi mengkonsumsi energi yang lebih besar daripada difusi gas.

# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Thermal diffusion**

- **Prinsip**

- Menggunakan perpindahan kalor pada lapisan tipis cairan atau gas untuk memisahkan isotop.
- Pendinginan lapisan vertical pada satu sisi dan pemanasan pada sisi yang lain akan menghasilkan arus konveksi berupa aliran ke atas pada permukaan panas dan aliran ke bawah sepanjang sisi yang lebih dingin
- Dengan kondisi yang seperti ini, molekul  $^{235}\text{UF}_6$  yang lebih ringan akan berdifusi menuju permukaan yang lebih panas dan  $^{238}\text{UF}_6$  yang lebih berat menuju ke sisi yang lebih dingin



# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Gaseous diffusion**

- **Sejarah**

- Difusi gas merupakan salah satu dari beberapa teknologi pemisahan isotop uranium yang dikembangkan sebagai bagian dari Manhattan Project.
- Dari beberapa teknologi pemisahan yang digunakan di Manhattan Project, difusi gas adalah yang paling penting



K-25 Gaseous Diffusion Plant, Oak Ridge

Sumber: [Manhattan Project: Processes > Uranium Isotope Separation > GASEOUS DIFFUSION](#)

# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Gaseous diffusion**

- **Prinsip**

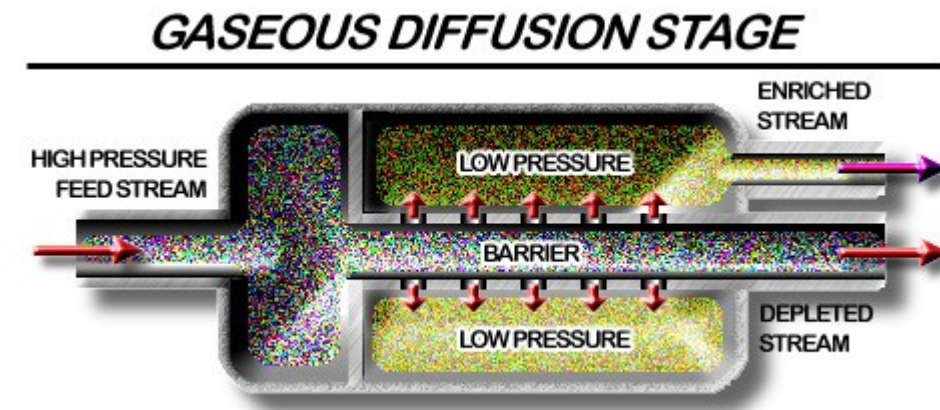
- Berdasar pada efusi molekul

Terjadi ketika gas dipisahkan dari vakum oleh penghalang berpori yang terdiri dari lubang-lubang mikroskopis

- Gas melewati lubang-lubang

Karena ada lebih banyak “tumbukan” dengan lubang pada sisi bertekanan tinggi daripada sisi bertekanan rendah, gas mengalir dari sisi tekanan tinggi ke sisi tekanan rendah.

- Molekul yang lebih ringan akan melewati penghalang lebih cepat daripada molekul yang lebih berat



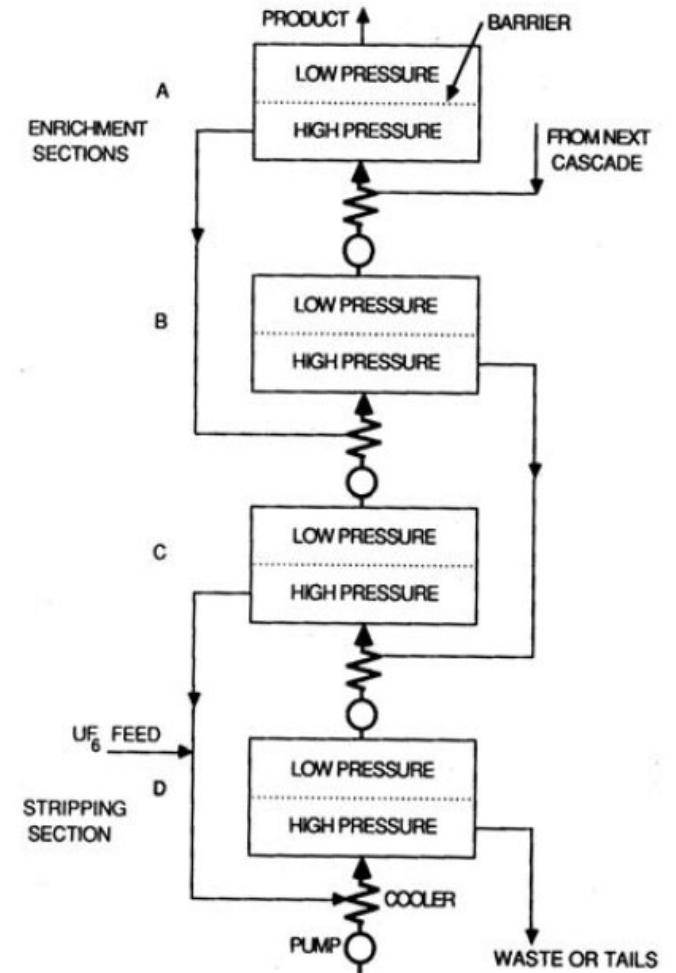
Sumber: Federation of American Scientists 2009.

# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

## • Gaseous diffusion

### • Prinsip

- Diperlukan banyak penghalang efusi (stage) untuk pengkayaan dengan jalan melewati aliran yang diperkaya melalui banyak stage-stage berurutan karena perbedaan laju yang kecil
- Efisiensi dari stage dapat ditingkatkan dengan menggunakan stage “enriching” dan stage “stripping”.



Sumber: Federation of American Scientists 2009.

# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Gaseous Centrifuge**

- **Sejarah**

- Salah satu teknologi yang dipertimbangkan AS selama Project Manhattan, tetapi metode difusi gas dan pemisahan elektromagnetik yang kemudian dikembangkan untuk produksi skala penuh.
- Centrifuge kemudian dikembangkan di Rusia oleh tim yang dipimpin ilmuwan Austria dan Jerman yang ditangkap selama perang dunia kedua.
- Kepala kelompok eksperimen di Rusia kemudian dilepaskan dan membawa teknologi centrifuge pertama kali ke AS dan kemudian ke eropa dimana dia mencoba mengembangkan penggunaan metode tersebut untuk memperkaya bahan bakar nuklir komersil.

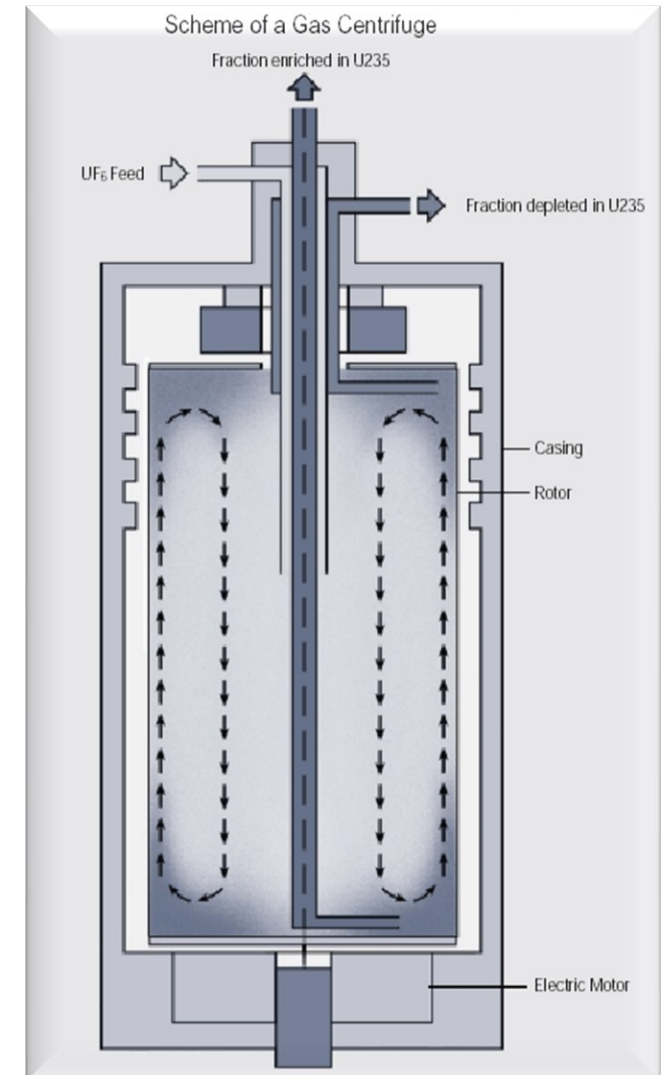


# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Gaseous Centrifuge**

- **Prinsip**

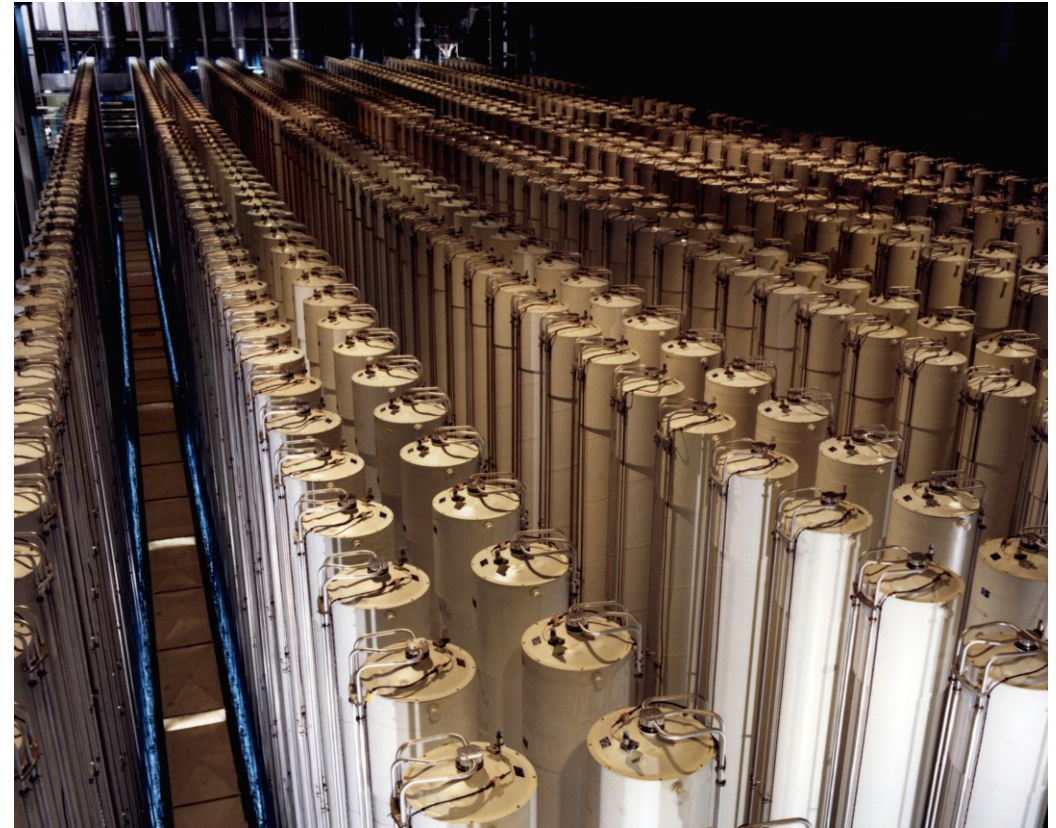
- Di dalam silinder yang berputar, gaya sentrifugal cenderung menekan molekul gas di silinder ke dinding luar
- Sementara itu kecepatan akibat agitasi termal cenderung mendistribusi molekul gas ke seluruh volume silinder.
- Konsentrasi molekul yang lebih ringan berkumpul di sekitar bagian tengah silinder yang berputar.



# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Gaseous Centrifuge**

- Serupa dengan difusi gas, diperlukan ribuan stage centrifuge untuk mengkayakan uranium untuk keperluan komersial maupun militer dengan kuantitas yang sama
- Pabrik centrifuge memerlukan penggunaan material khusus untuk mencegah korosi oleh uranium hexafluorida.



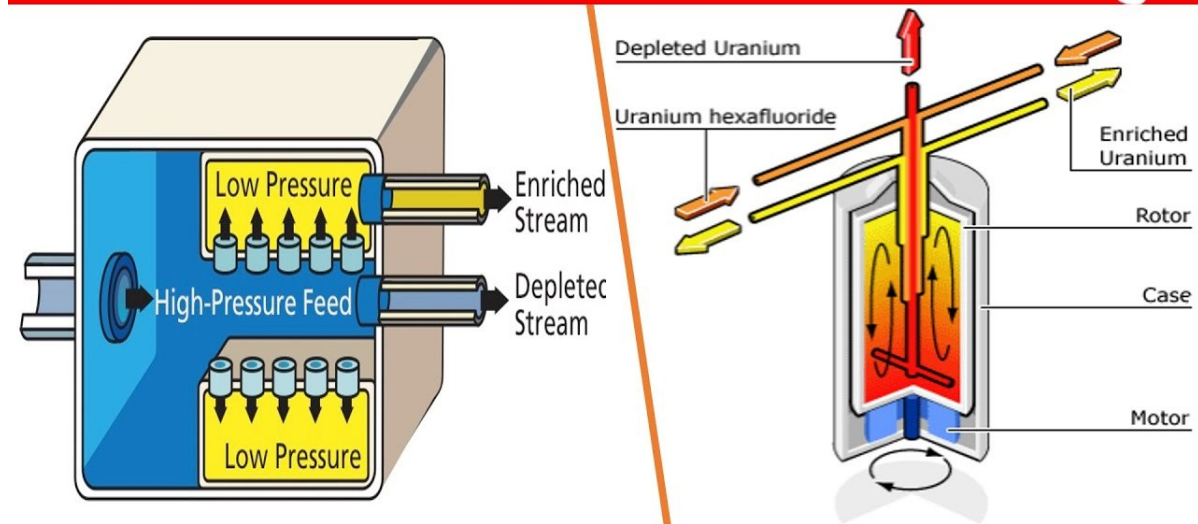
Sumber: U.S. Department of Energy <http://www.doedigitalarchive.doe.gov/ImageDetailView.cfm?ImageID=1000682&page=search&pageid=thumb>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=707601>

# PENINGKATAN-Metode Peningkatan Uranium

## • Gaseous Centrifuge

- Kelebihan centrifuge gas dibandingkan proses difusi gas:
  - Memerlukan energi 40 s.d. 50 kali lebih sedikit untuk mencapai tingkat peningkatan yang sama ( 50-60kWh/SWU untuk centrifuge, 2400-2500 kWh/SWU untuk difusi).
  - Penggunaan centrifuge mengurangi jumlah kalor limbah yang dibangkitkan dalam mengkonversi gas UF<sub>6</sub>.
  - Penggunaan centrifuge mengurangi jumlah pendingin, seperti freon yang diperlukan.

## Gaseous Diffusion $V_s$ Gas Centrifuge



# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Electromagnetic Isotope Separation**

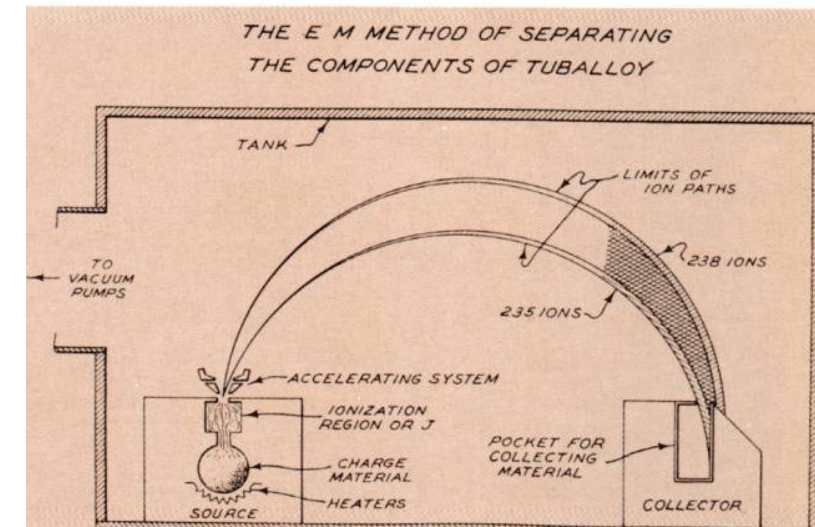
- **Sejarah**

- Merupakan jenis ketiga proses pengkayaan uranium yang digunakan di masa lalu pada skala besar.
- Pabriknya dibangun di Oak Ridge, Tennessee selama Manhattan Project.
- Digunakan untuk memperkaya uranium untuk bom.

# PENGGKAYAAN-Metode Pengkayaan Uranium

## • Prinsip Electromagnetic Isotope Separation

- Partikel bermuatan bergerak di medan magnet akan mengikuti lintasan yang melengkung dengan jari-jari lintasan tergantung dari massa partikel.
- Partikel yang lebih berat akan mengikuti lintasan yang lebih lebar dibandingkan partikel yang lebih ringan, jika mereka mempunyai muatan yang sama dan bergerak dengan kecepatan yang sama.
- Dalam proses pengkayaan, uranium tertaklorida diionisasi menjadi plasma uranium.
- Ion uranium kemudian dipercepat dan melewati medan magnet yang kuat.
- Setelah bergerak sepanjang setengah lingkaran, pancaran akan dipisahkan ke daerah yang lebih dekat dengan dinding sebelah dalam (kaya U-235) dan dinding sebelah luar (miskin U-235)





# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Electromagnetic Isotope Separation**

- **Kekurangan**

- Sejumlah besar energi diperlukan untuk mempertahankan medan magnetic yang kuat.
- Laju pengambilan material umpan uranium rendah.



Alpha Racetrack, Y-12 Electromagnetic Plant, Oak Ridge

# PENINGKATAN-Metode Pengkayaan Uranium

- **Aerodynamic Process**

- **Sejarah**

- Jenis terakhir proses pengkayaan uranium yang dilakukan dalam skala besar.
- Pertama kali dikembangkan di Jerman.
- Pada kenyataannya, pabrik pengkayaan juga mensuplai sekitar 400 kg uranium diperkaya sampai lebih dari 80% untuk penggunaan militer.

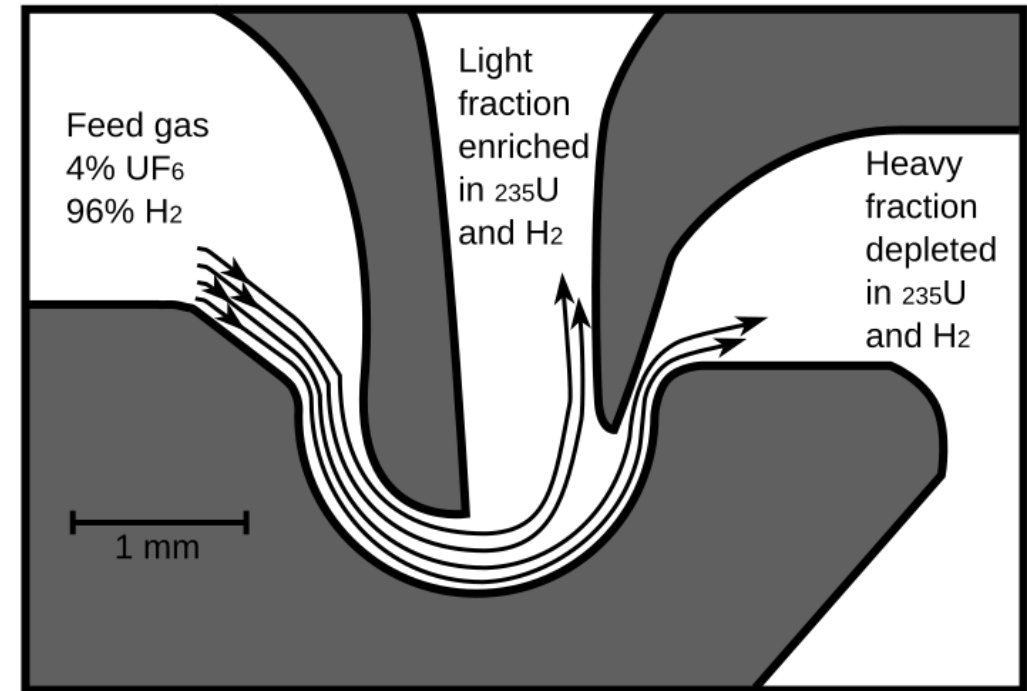


# PENGGAYAAN-Metode Pengkayaan Uranium

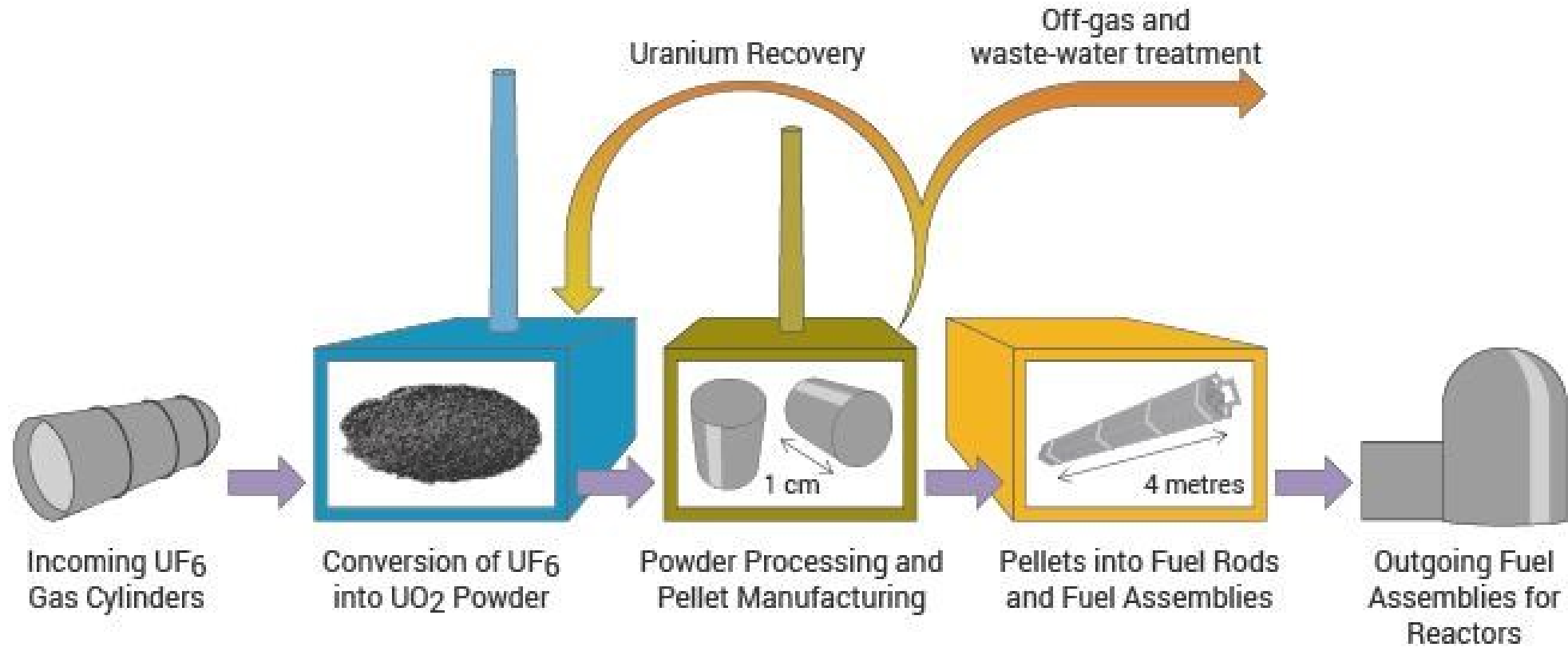
## • Aerodynamic Process

### • Prinsip

- Menggunakan Teknik jet nozzle yang dikembangkan oleh EW Becker.
- Nozzle dalam keadaan vakum
- Campuran aliran gas mengalami percepatan sentrifugal yang besar ketika bergerak melewati celah yang melengkung dan penyebaran pancaran gas
- Isotop yang lebih ringan akan tersebar terlebih dahulu sehingga terjadi pemisahan antar U-235 dengan U-238
- Prinsip ini tergantung kepada difusi yang disebabkan oleh gradien tekanan seperti halnya pada centrifugal gas
- Peningkatan gaya sentrifugal dapat mengencerkan UF<sub>6</sub> dengan hydrogen atau helium sebagai gas pembawa sehingga mencapai kecepatan aliran yang lebih tinggi dibandingkan dengan uranium hexafluoride murni.



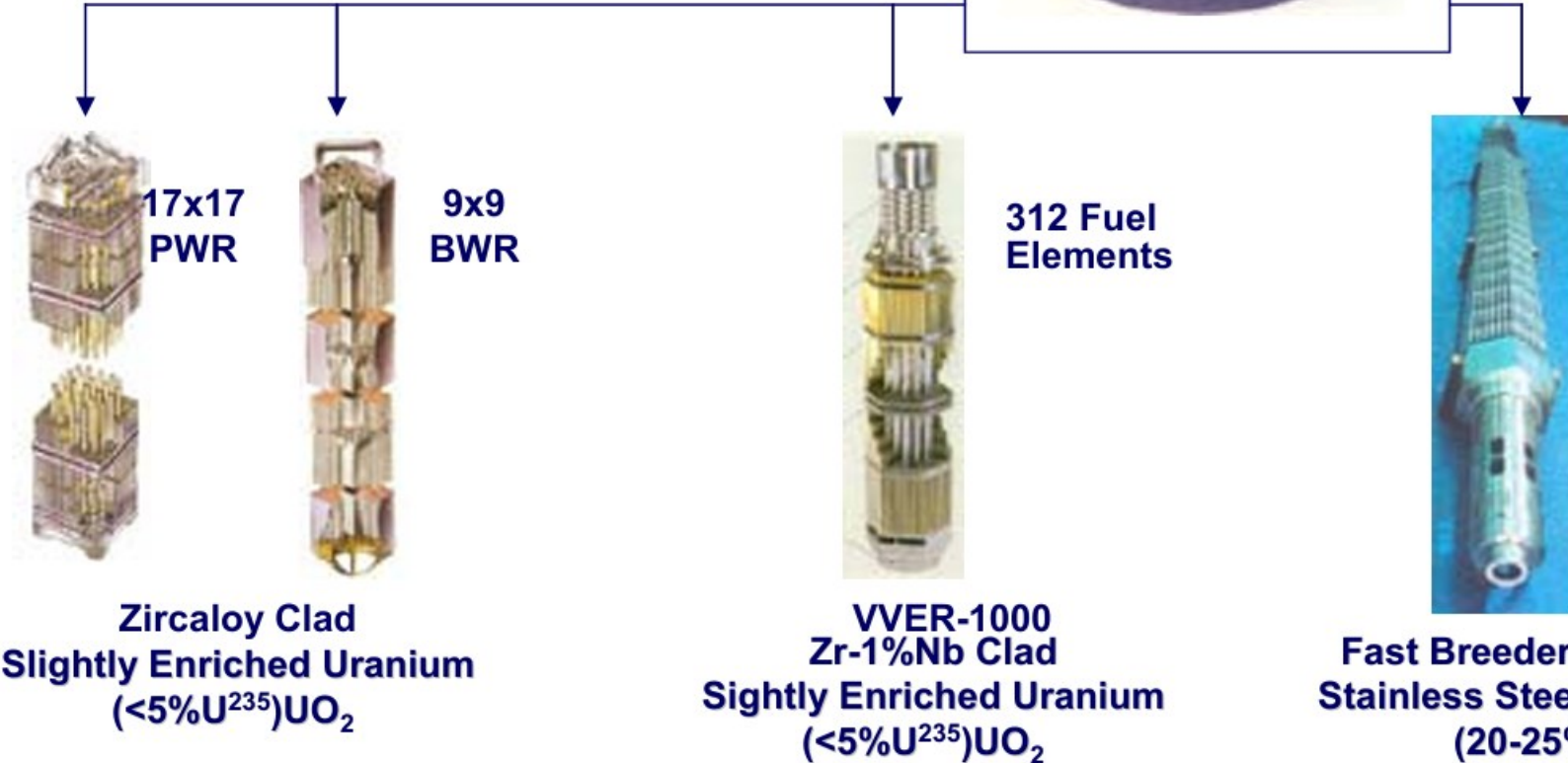
# FABRIKASI





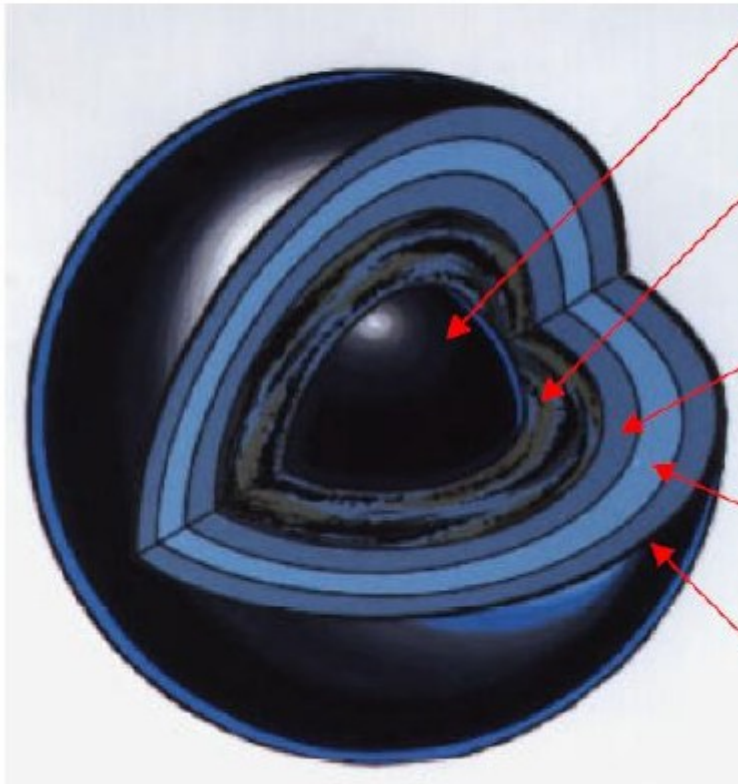
37 Fuel Elements  
CANDU/PHWR  
Zircaloy Clad,  
Natural  $UO_2$  Fuel

### Ceramic Fuel Pellets



# FABRIKASI

# FABRIKASI



- Fuel Kernel
  - Provide fission energy/destroy Pu/MA
  - Retain fission products
- Buffer layer (porous carbon layer)
  - Attenuate fission recoils
  - Void volume for fission gases
- Inner Pyrocarbon (IPyC)
  - Provide support for SiC during manuf. and irradi.
  - Prevent Cl- attack of kernel during SiC deposition
  - Retain gaseous fission products
- Silicon Carbide (SiC)
  - Primary load bearing member
  - Retain gaseous and metal fission products
- Outer Pyrocarbon (OPyC)
  - Protects SiC from surroundings
  - Hold SiC in compression

# FABRIKASI

- Kondisi-kondisi penting yang harus dipenuhi untuk kinerja bahan bakar yang dapat diterima:
  - Reaktivitas dan control
  - Sifat-sifat termohidrolik dan kalor
  - Pengungkung material radioaktif baik pada kondisi normal maupun abnormal
  - Minimalisasi pengotor penyerap neutron di semua material
  - Kompetitif dari segi biaya terhadap bahan bakar yang lain:
    - Lama waktu tinggal bahan bakar di teras reaktor
    - Manajemen bahan bakar dalam teras yang efektif, juga untuk burnup tinggi
    - Standardisasi bahan bakar agar dihasilkan metode produksi yang efisien
    - Keandalan material dan pekerja
  - Keadaan paling utama dikenakan pada bahan bakar
    - Bahan bakar tidak boleh mencapai titik lelehnya
    - Tidak boleh ada produk fisi yang dilepaskan ke pendingin



# Litbang Konversi dan Fabrikasi BBN di Indonesia



Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) adalah salah satu instalasi di BRIN yang berfungsi mendukung kegiatan pengembangan teknologi bahan bakar reaktor daya meliputi:

- Konversi YC menjadi serbuk  $UO_2$  murni berderajad nuklir
- Fabrikasi bahan bakar berbasis pelet  $UO_2$  sinter dalam kelongsong zirkaloi, bahan bakar HTGR
- Kendali kualitas proses bahan bakar nuklir

# Litbang Konversi dan Fabrikasi BBN di Indonesia

## Fasilitas Pilot Conversion Plant (PCP)



Pemurnian dan konversi uranium alam menjadi serbuk  $UO_2$  murni berderajat nuklir.



*Yellow cake*)



Serbuk  $UO_2$

Proses antara lain crushing, pengayakan, pelarutan, pemurnian, pemekatan, pengendapan, penyaringan, pengeringan, kalsinasi, reduksi, pasivasi



# KONVERSI YELLOW CAKE MENJADI $UO_2$



Yellow cake

Proses pelarutan yellow cake



Ekstraksi uranil nitrat menggunakan  
TBP - kerosin



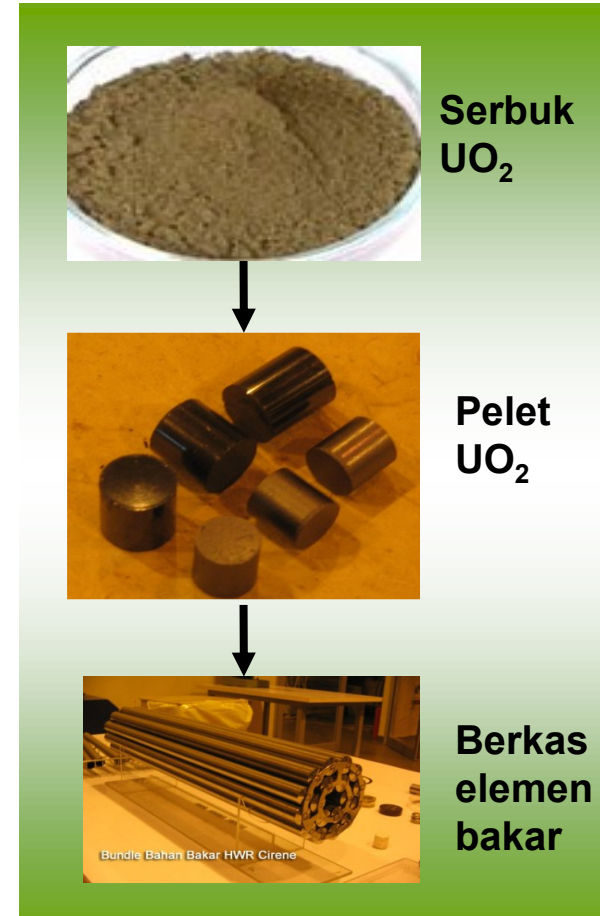
Serbuk  $UO_2$  murni nuklir

## Fabrikasi ELEMEN BAKAR NUKLIR

Fabrikasi elemen bakar reaktor daya berbasis pelet  $\text{UO}_2$  dalam kelongsong zirkaloi. Laboratorium mampu menangani pengkayaan U-235 hingga 5%.



Proses antara lain mixing, sieving, kompaksi, sintering, grinding, fuel filling, pengelasan pin dan berkas, pasivasi



Kapasitas produksi : 3 berkas / hari





## Fabrikasi Perangkat Bakar Nuklir

1. Peletisasi
2. Penyiapan Komponen
3. Perakitan Elemen Bakar (Pin)
4. Perakitan Perangkat Bakar



Pelet UO<sub>2</sub>



Komponen



Batang Bakar HWR Cirebon

Perangkat Bakar



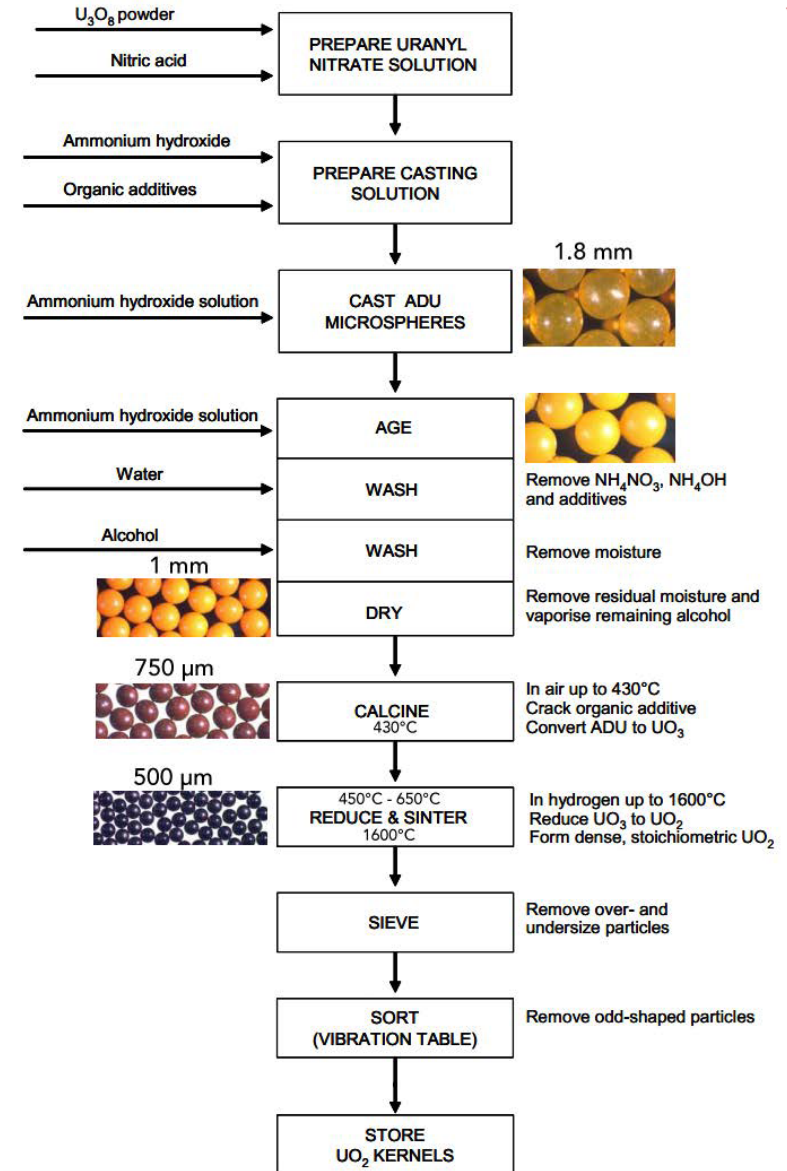
Pin Bakar HWR Cirebon

Pin Bakar HWR CANDU

Elemen Bakar



# HTGR FUEL RESEARCH

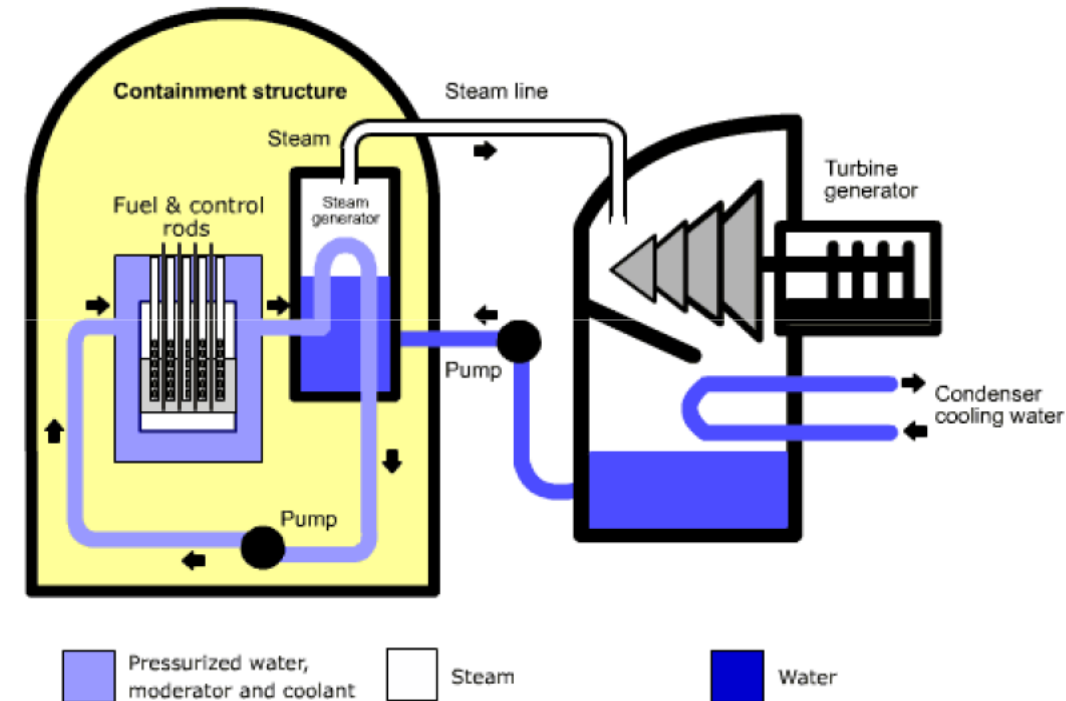


# IN CORE FUEL MANAGEMENT

# IN CORE FUEL MANAGEMENT

## Proses pembangkitan daya

- Bahan bakar yang diisikan kedalam reaktor nuklir mengalami reaksi fisi (pemecahan) atom U-235 dan melepaskan energi
- Energi ini digunakan untuk memanaskan air dan menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin.
- Selama operasi reaktor, sebagian dari atom uranium berubah menjadi unsur lain akibat fisi maupun serapan neutron.
- Unsur-unsur ini berupa produk fisi yang merupakan limbah radioaktif dan plutonium.

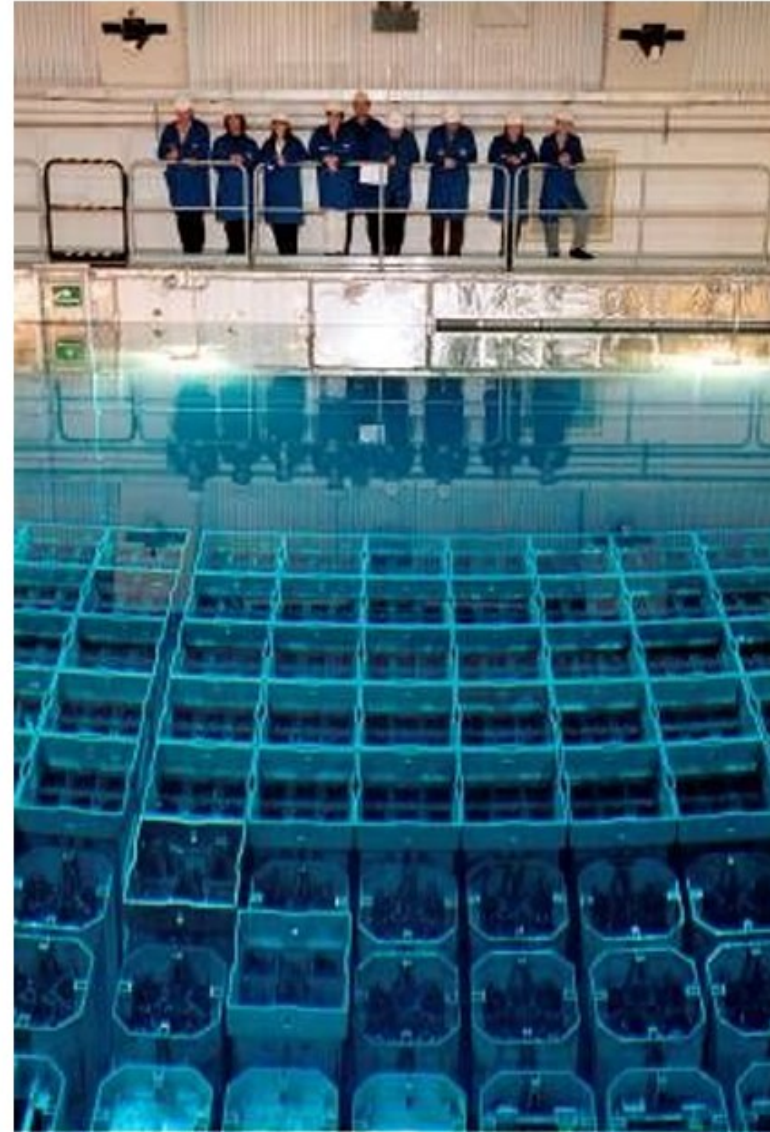


# AKTIVITAS BACK-END

# Back End Fuel Cycle

## Penyimpanan bahan bakar bekas (Spent fuel)

- Bahan bakar bekas disimpan dalam reaktor selama 4-10 tahun tergantung jenis reaktor.
- Ketika bahan bakar diambil dari reaktor, bahan bakar tersebut masih memancarkan radiasi dan kalor sehingga harus disimpan di fasilitas khusus agar kalor dan radiasi berkurang.

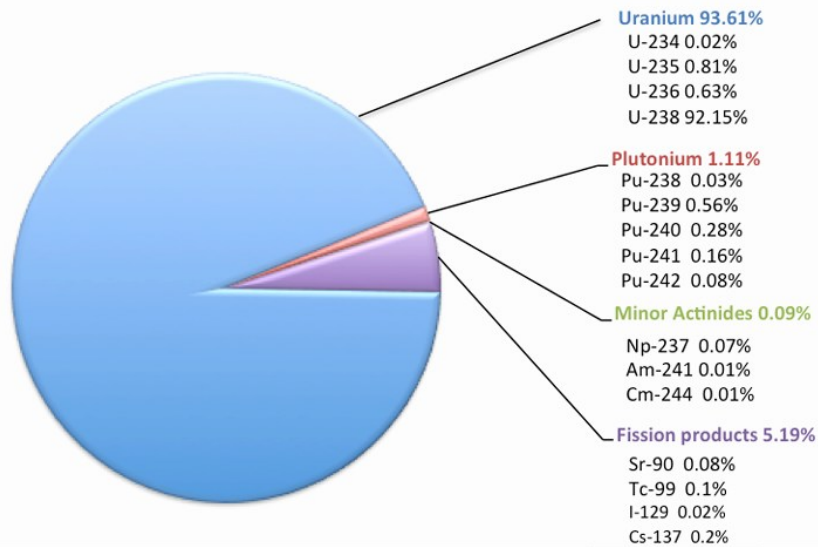




# Back End Fuel Cycle

Opsi untuk bahan bakar bekas

- Penyimpanan jangka panjang dan final tanpa pengolahan ulang (reprocessing)
- Reprocessing untuk mengambil bagian yang masih dapat digunakan



Country	Commercial scale reprocessing facility		Spent fuel currently in another country for reprocessing	Earlier reprocessing, but practice currently ceased	Planning direct placement of spent fuel in a repository	Keeping options open
	Existing	Planned				
Italy			✓			
Japan <sup>d</sup>		✓	✓			
Korea, Republic of						✓
Lithuania					✓	
Mexico						✓
Netherlands			✓			
Romania					✓	
Russian Federation	✓	✓				
Slovakia				✓	✓	
Slovenia					✓	
Spain				✓	✓	
Sweden				✓	✓	
Switzerland				✓	✓	
Turkey					✓	
UK <sup>e</sup>	✓			✓	✓	
Ukraine <sup>f</sup>			✓	✓		✓
USA				✓	✓	

<sup>a</sup> Mixed policy: some fuel has been or will be reprocessed; other fuel will or may be direct disposed.

<sup>b</sup> The main policy in China is domestic reprocessing. However, some fuel, mainly from CANDU reactors, is planned for direct disposal.

<sup>c</sup> Earlier fuel returns to the Russian Federation, but no requirement to return waste from reprocessing to Hungary.

<sup>d</sup> Commercial scale facility at Rokkasho-mura has been constructed and is undergoing test operation.

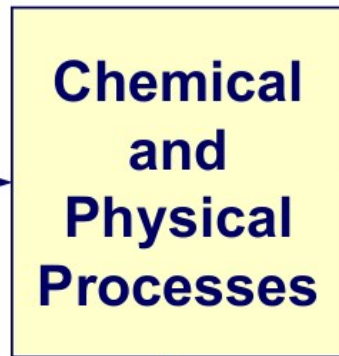
<sup>e</sup> The UK has ceased reprocessing on expiry of current contracts.

<sup>f</sup> Some spent fuel is sent to the Russian Federation for reprocessing. Other fuel is stored awaiting a final decision.

# Back End Fuel Cycle - Reprocessing



Spent Fuel



U  
Pu

Waste

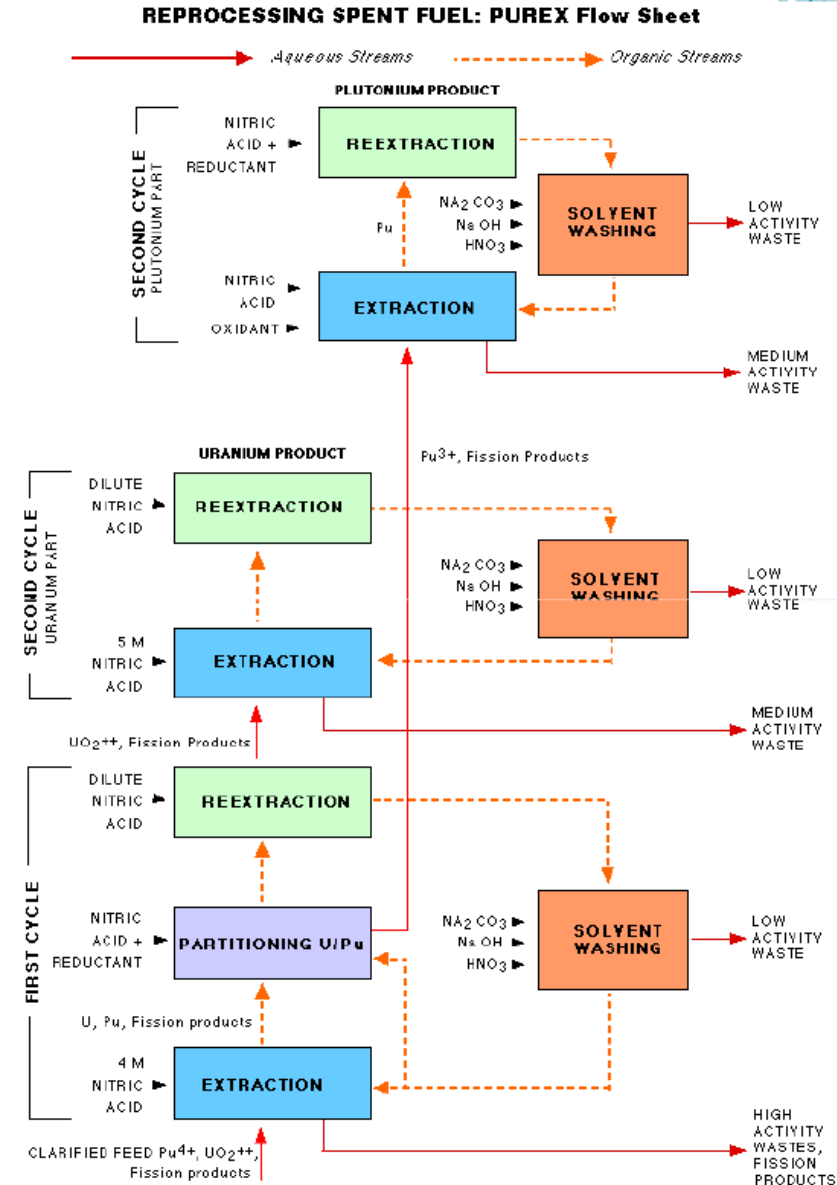


Commercial reprocessing in a few countries' markets exists – 15 % of fuel is reprocessed

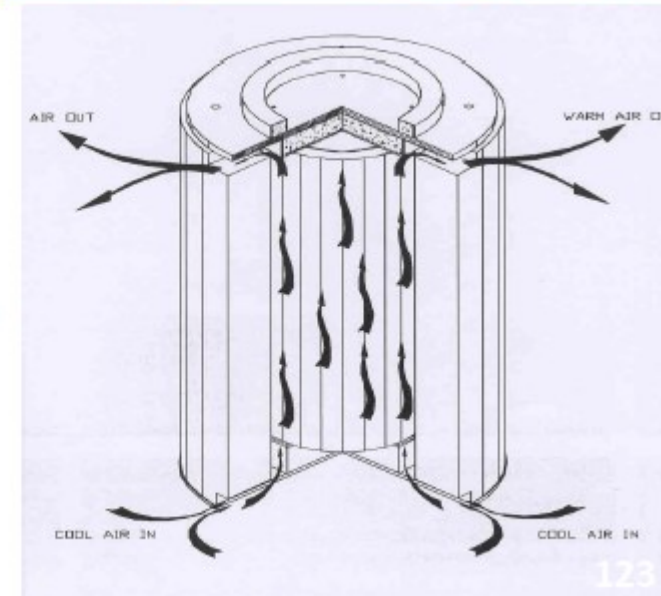
## PUREX

Plutonium Uranium Refining by Extraction

- ❑ Untuk memisahkan uranium dan plutonium dari produk fisi.
- ❑ 30% tributyl fosfat (TBP) dalam kerosen digunakan sebagai pelarut organik



- Tanpa reprocessing
  - Penyimpanan basah
    - FA di dalam kolam yang besar dan dalam yang diisi dengan air di dalam bangunan pembangkit.
    - Air bertindak sebagai pendingin sekaligus sebagai perisai radiasi.
  - Penyimpanan kering
    - Meletakkan bahan bakar di dalam wadah baja kedap udara, yang diletakkan di dalam kontainer beton yang diperkuat dengan beton
    - Sistem pasif tanpa bagian yang bergerak. Bahan bakar didinginkan oleh udara yang masuk dari sisi kontainer dan bersirkulasi di sekitar sisi luar wadah baja.





# Back End Fuel Cycle

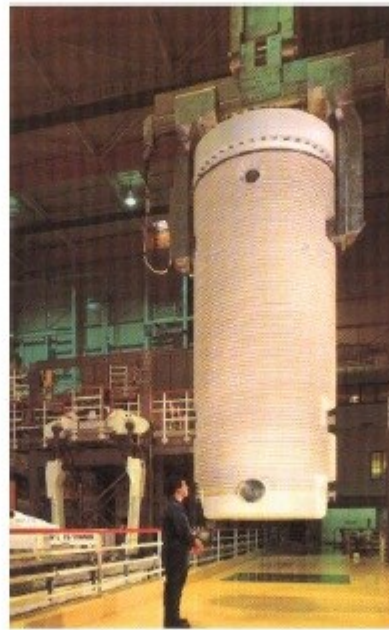
- o Tanpa reprocessing



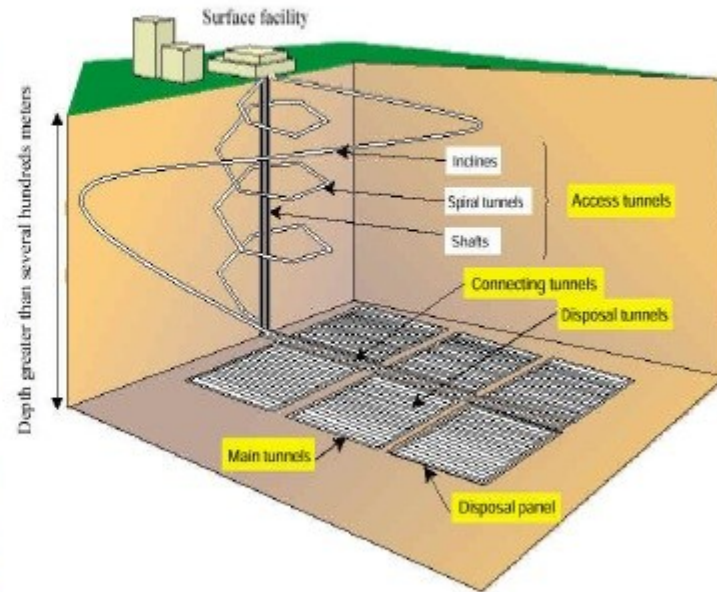
Penyimpanan basah



Penyimpanan kering



Spent fuel Cask

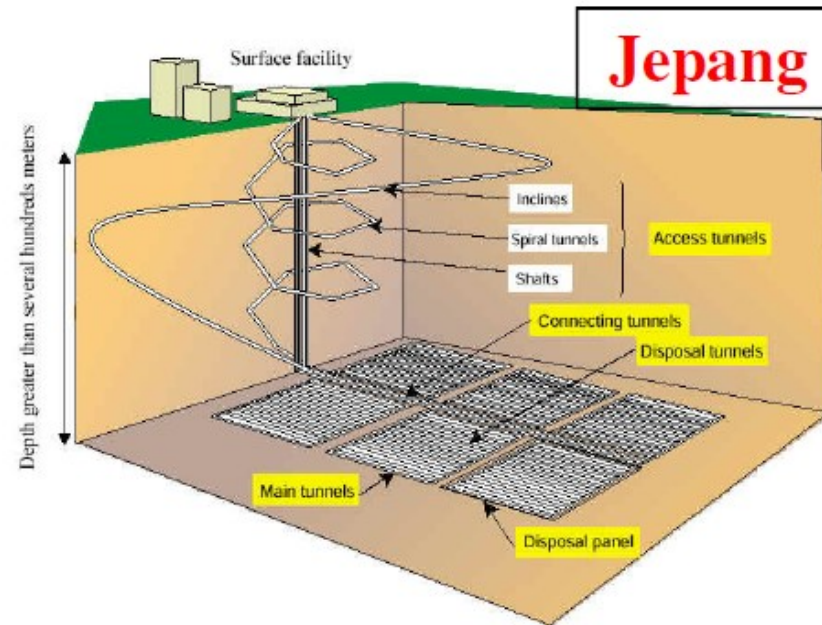
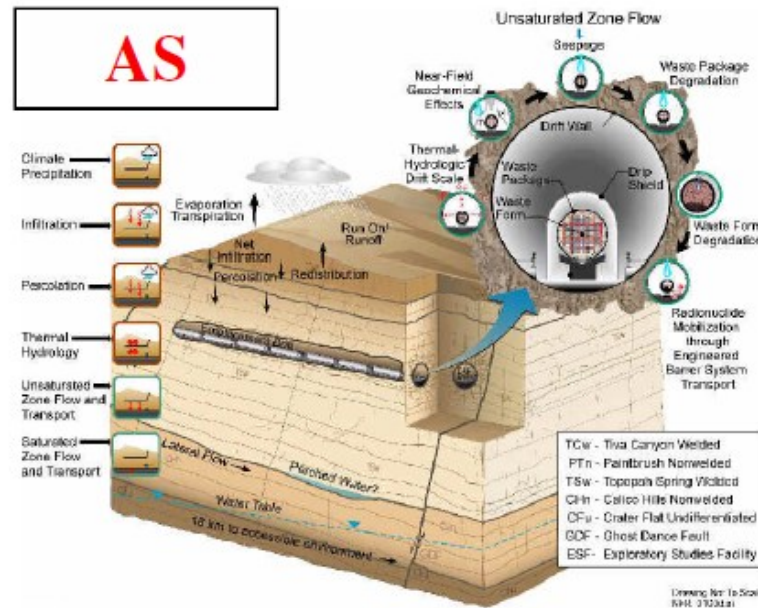


Penyimpanan bawah tanah



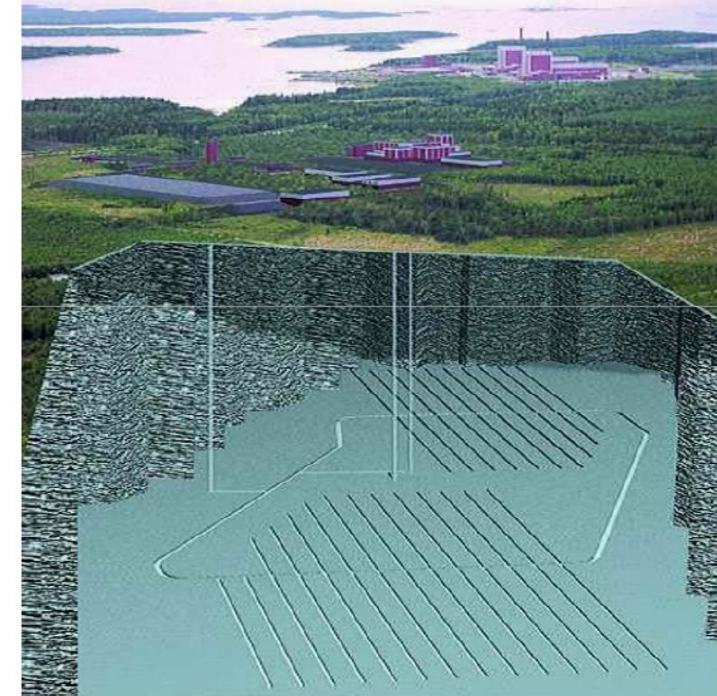
# Back End Fuel Cycle

- Tanpa reprocessing
  - Sampai sekarang belum ada fasilitas penyimpanan lestari bahan bakar bekas





# Back End Fuel Cycle



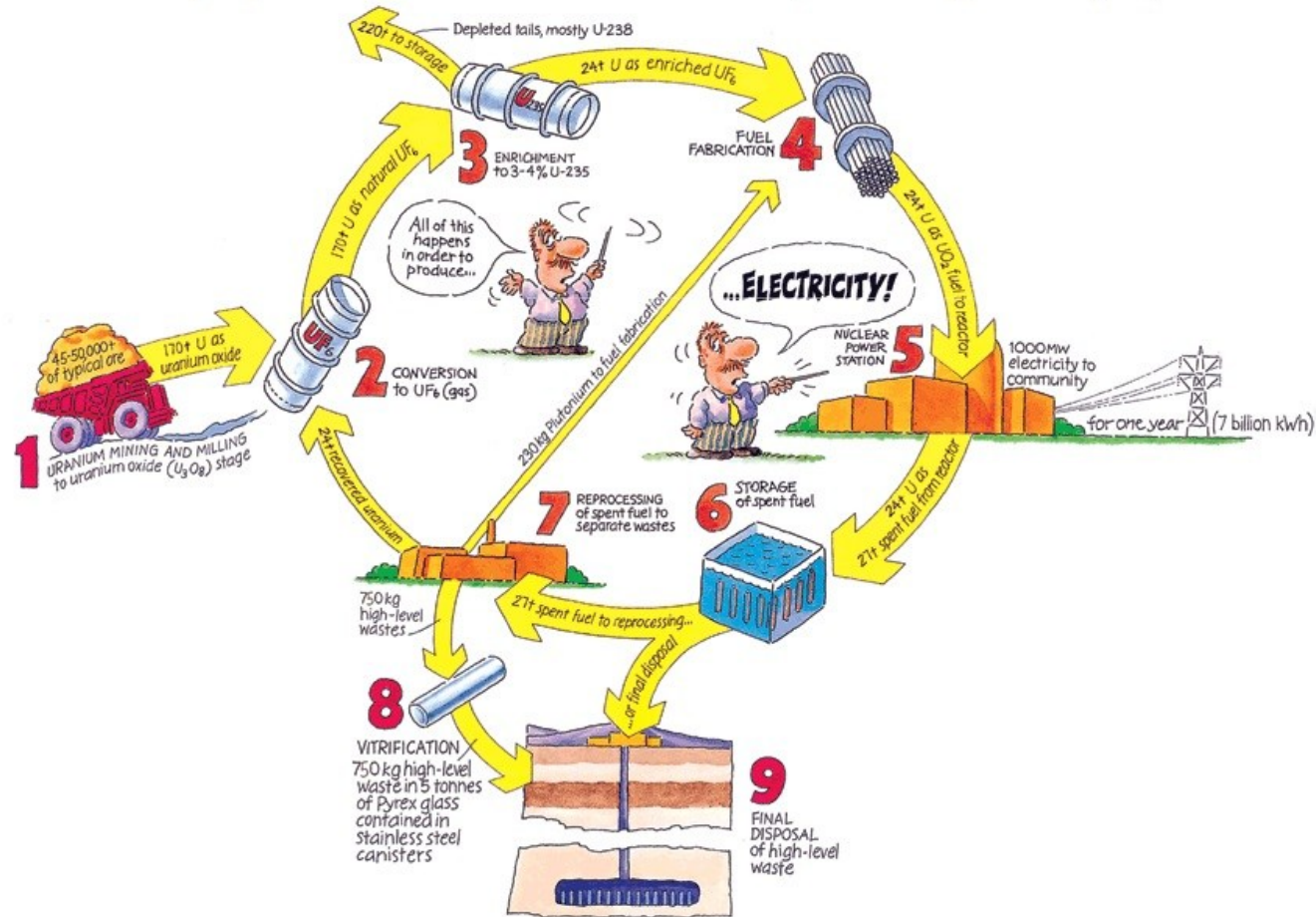
## RINGKASAN

- Apa itu siklus bahan bakar nuklir?
  - Aktivitas, atau langkah-langkah, fisik maupun kimia, yang terkait secara langsung dengan produksi daya di reaktor nuklir.
  - **Front-end fuel management**
    - Penambangan dan milling (bijih,  $U_3O_8$ ) → Konversi ( $UF_6$ ) → Pengkayaan (0.7% → 3~4%  $^{235}U$ ) → Fabrikasi bahan bakar ( $UO_2$ )
  - **In-core fuel management**
    - Untuk reaktor dengan output 1000 MWe, teras reaktor berisi sekitar 75 ton uranium berpengkayaan rendah.
    - Sekitar sepertiga dari bahan bakar bekas diambil dari reaktor setiap tahun atau 18 bulan untuk diganti dengan bahan bakar baru.



## RINGKASAN

- Back-end fuel management
  - Penyimpanan bahan bakar bekas → Reprocessing → Penyimpanan lestari



TERIMA KASIH