



Japan Atomic
Energy Agency

NUCLEAR REACTOR FUEL CYCLE

Ganisa Kurniati Suryaman

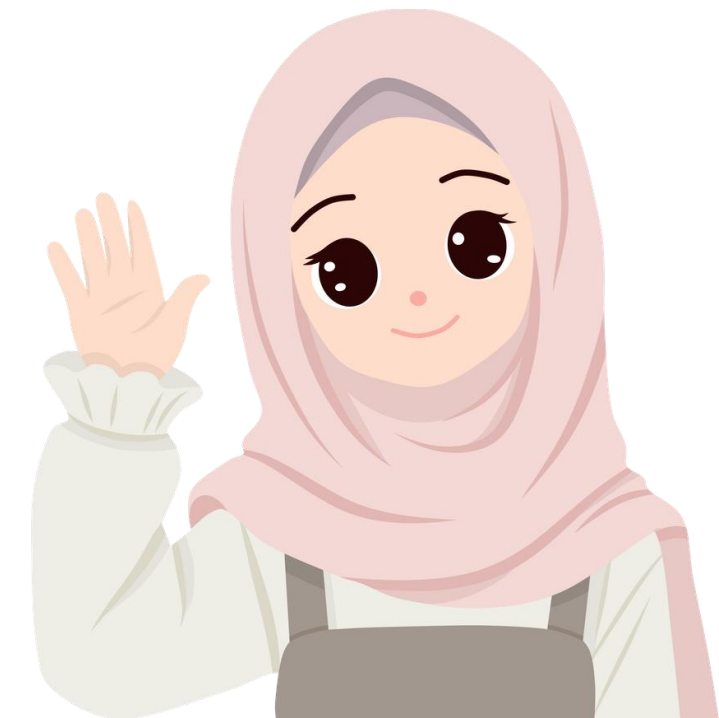
**Follow Up Training Course on
Reactor Engineering and Safety:
High-Temperature Gas-Cooled Reactor**

Yogyakarta, 18 - 22 May 2026



Biodata

- **Nama** : **Ganisa Kurniati Suryaman**
- **Unit Kerja** : **Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif**
- **Kelris** : **Teknologi Bahan Bakar Nuklir**
- **Email** : **gani002@brin.go.id**
- **Pendidikan** : **S1 ITB (Teknik Material)**
S2 UGM (Tenik Mesin)
- **Pelatihan** : **Instruction Training Course, Reactor Engineering Japan 2023**



Outline



1

Nuclear Fuel Cycle Overview

2

Front End

3

In Core Fuel Management

4

Back End

5

Conclusion



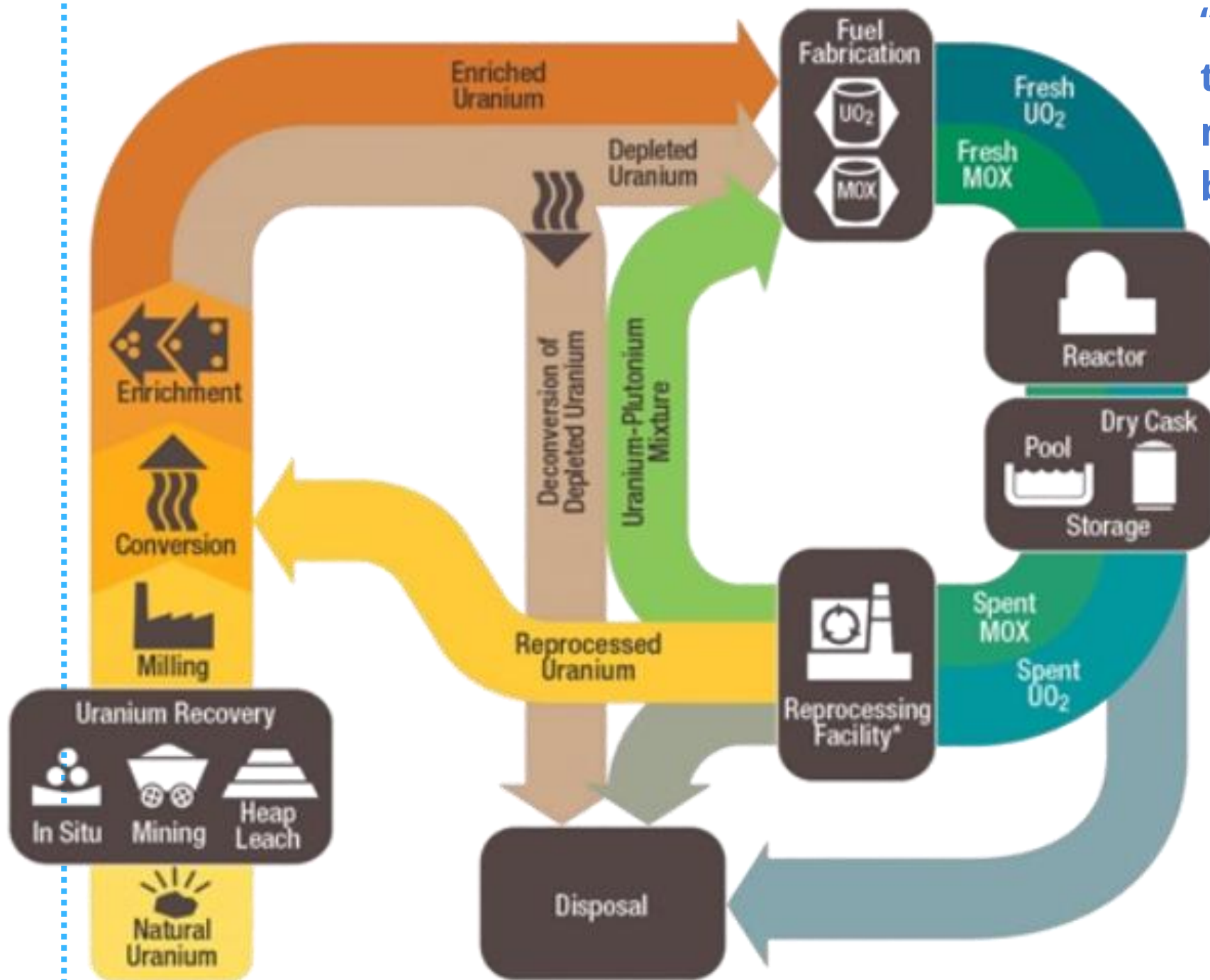
Nuclear Fuel Cycle Overview



“Siklus bahan bakar” adalah rangkaian tahapan teknis yang menggambarkan seluruh daur hidup material fisil dan zat radioaktif yang terkait dengan bahan bakar nuklir.

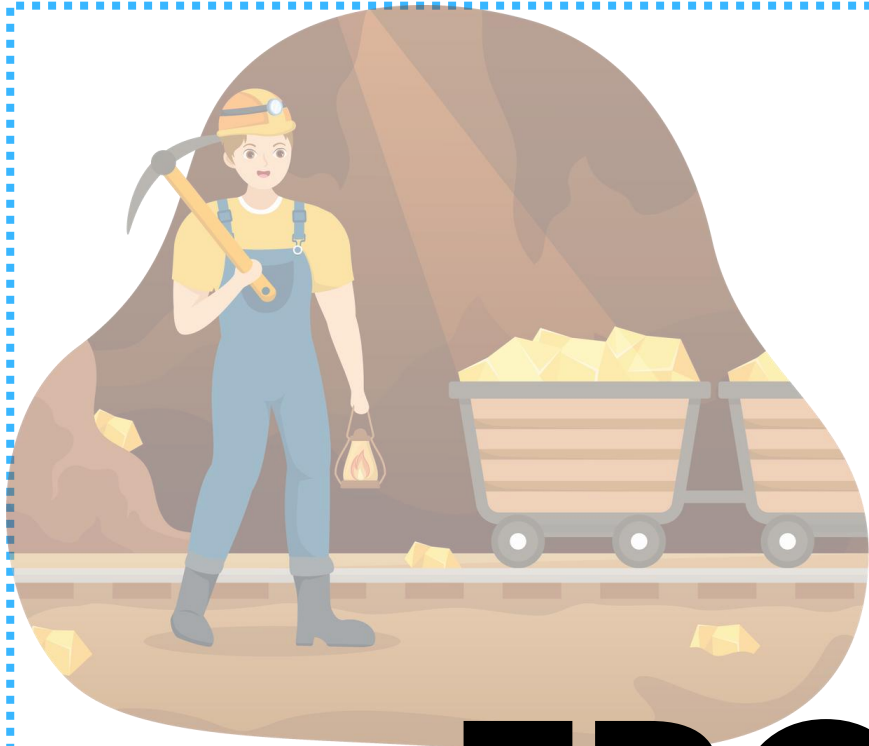
Siklus bahan bakar tiap negara dapat berbeda tergantung pada:

- Jenis reaktor yang digunakan (CANDU, PWR, BWR, HTGR,dll)
- Jenis reaktor yang direncanakan untuk generasi berikutnya
- Strategi pengelolaan bahan bakar bekas (spent fuel management)
 - Jika bahan bakar bekas tidak diproses ulang (reprocessing), maka disebut siklus bahan bakar terbuka (**open fuel cycle**)
 - Jika bahan bakar bekas diproses ulang, maka disebut siklus bahan bakar tertutup (**closed fuel cycle**)

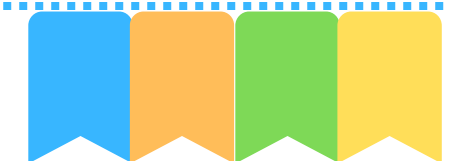


Sumber: <https://ukinventory.nda.gov.uk/wp-content/uploads/2016/06/nuclear-fuel-cycle.jpg>





FRONT END ACTIVITIES

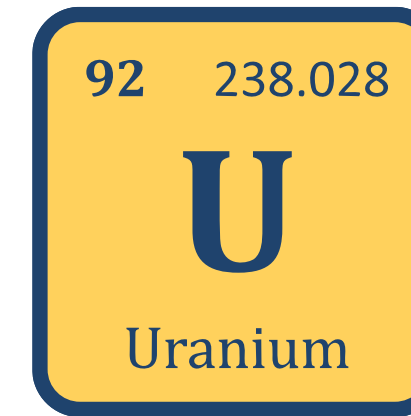


MINING

Global Distribution of Identified Recoverable Conventional Uranium Resources (<USD 130/kgU as of 1 January 2023)



Sumber: URANIUM 2024: RESOURCES, PRODUCTION AND DEMAND, NEA No. 7683, © OECD 2025



- 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/m³), temperatur leleh: 1132,2 C
- Isotop di alam: U-234, U-235, U-238



World Uranium Mining Production



Country	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Kazakhstan	23,607	24,689	23,321	21,705	22,808	19,477	21,819	21,227	21,109	23,270
Canada	13,325	14,039	13,116	7001	6938	3885	4693	7351	11,001	14,309
Namibia	2993	3654	4224	5525	5476	5413	5753	5611	6986	7333
Australia	5654	6315	5882	6517	6613	6203	4192	4553	4693	4598
Uzbekistan (est.)	2385	3325	3400	3450	3500	3500	3516	3561	4000	4000
Russia	3055	3004	2917	2904	2911	2846	2635	2508	2710	2738
China (est.)	1616	1616	1692	1885	1885	1885	1600	1700	1600	1600
Niger	4116	3479	3449	2911	2983	2991	2248	2020	1130	962
India (est.)	385	385	421	423	308	400	600	600	485	500
South Africa (est.)	393	490	308	346	346	250	192	200	200	200
Ukraine (est.)	1200	808	707	790	800	744	455	100	340	288
USA	1256	1125	940	582	58	6	8	75	19	260
Others	357	277	85	116	116	131	95	108	161	155
World total tU	60,342	63,207	60,462	54,154	54,742	47,731	47,805	49,614	54,433	60,213
World total tU3O8	71,158	74,536	71,299	63,861	64,554	56,286	46,374	58,507	64,190	71,006
% of world demand	98%	96%	93%	80%	81%	74%	76%	76%	83%	90%

Sumber: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production>



Uranium Mining Method

Open Pit Mining

- Untuk deposit yang dangkal
- Luas wilayah eksplorasi yang besar dengan pengambilan material yang banyak.



Tambang Uranium di Namibia

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

Kelebihan	Kekurangan
Lebih ekonomis (metoda sangat sederhana)	dampak kerusakan lingkungan sangat besar seperti pengrusakan habitat, kontaminasi groundwater dan limbah batuan yg banyak
Efisien (High production rates)	debu hasil proses penambangan dapat berbahaya bagi kesehatan

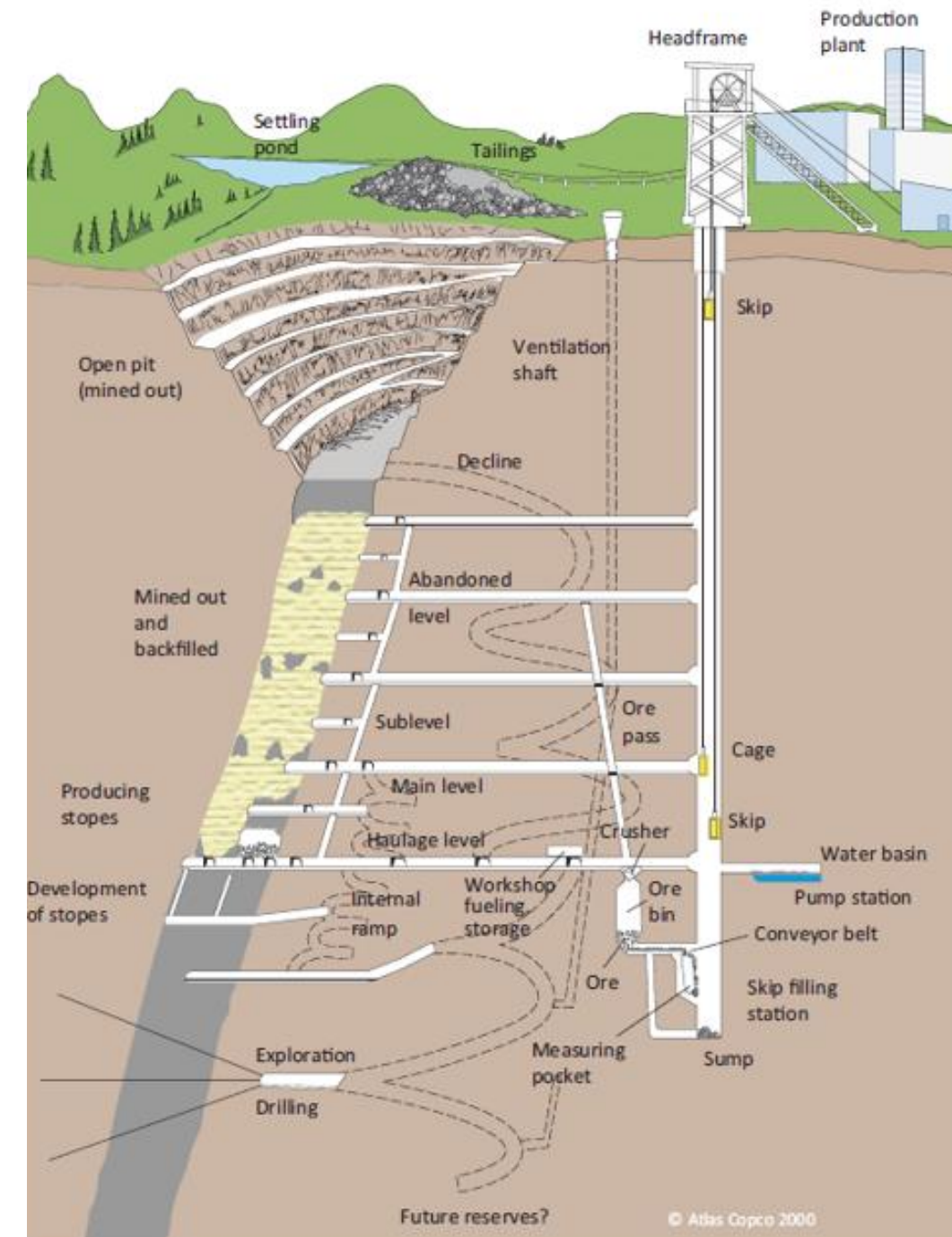


Uranium Mining Method

Underground Mining

- Dilakukan ketika bijih uranium terlalu dalam untuk dilakukan eksplorasi dengan metode open pit
- Hanya beberapa lubang di permukaan

Kelebihan	Kekurangan
Kerusakan permukaan tanah lebih minim	Risiko kesehatan yang lebih tinggi bagi pekerja karena paparan gas radon dan debu radioaktif.
Targeted Extraction	Memerlukan biaya investasi dan operasional yang jauh lebih mahal.



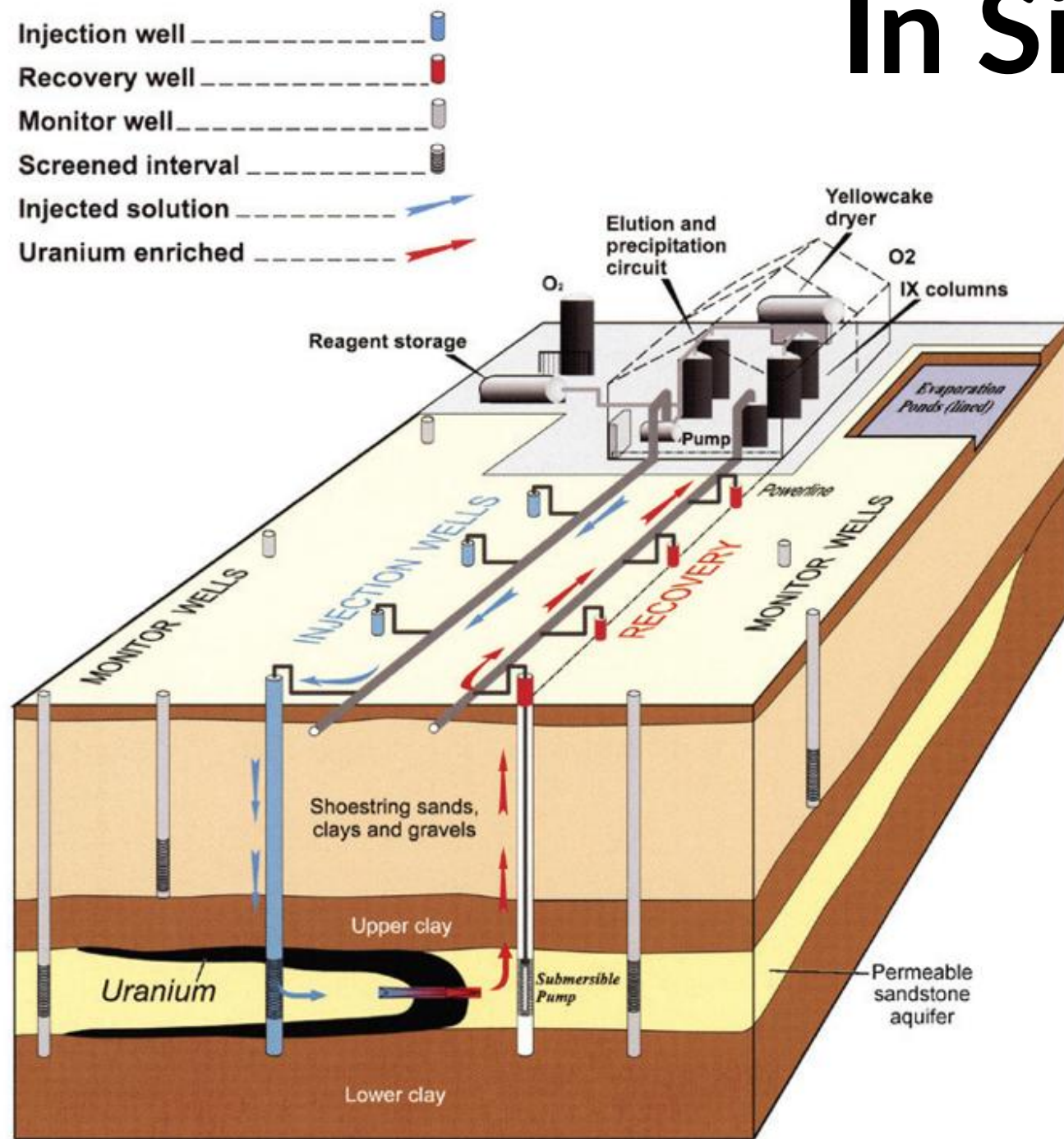
Sumber: Morton, KL. Comparison of Designs for The Dewatering of Coal, Gold and Diamond Mines in Southern Africa, International Mine Water Conferences, 2009.



Uranium Mining Method

In Situ Leaching (ISL)

Bahan kimia pelarut dipompakan langsung ke dalam tanah untuk melarutkan uranium, kemudian larutan tersebut dipompa kembali ke permukaan.



Kelebihan	Kekurangan
Dampak lingkungan minimal	Hanya dapat digunakan pada kondisi geologi tertentu
Uranium tidak perlu melalui proses milling karena uranium oksida sudah dilindi menjadi bentuk larutan yang kaya uranium	Potensi kontaminasi air tanah jika tidak dikelola dengan benar.
Mengurangi potensi bahaya untuk pekerja dari kecelakaan debu dan radiasi	Tidak mungkin untuk mengembalikan kondisi air tanah alami setelah operasi pelindian selesai

NOTE: Not to scale - diagrammatic only

Sumber: Dept. of Resources, Energy and Tourism Australia, Draft of National In Situ Leach Uranium Mining BEst Practice Guide: Ground Waters, Wastes and Radiation Protection, 2009



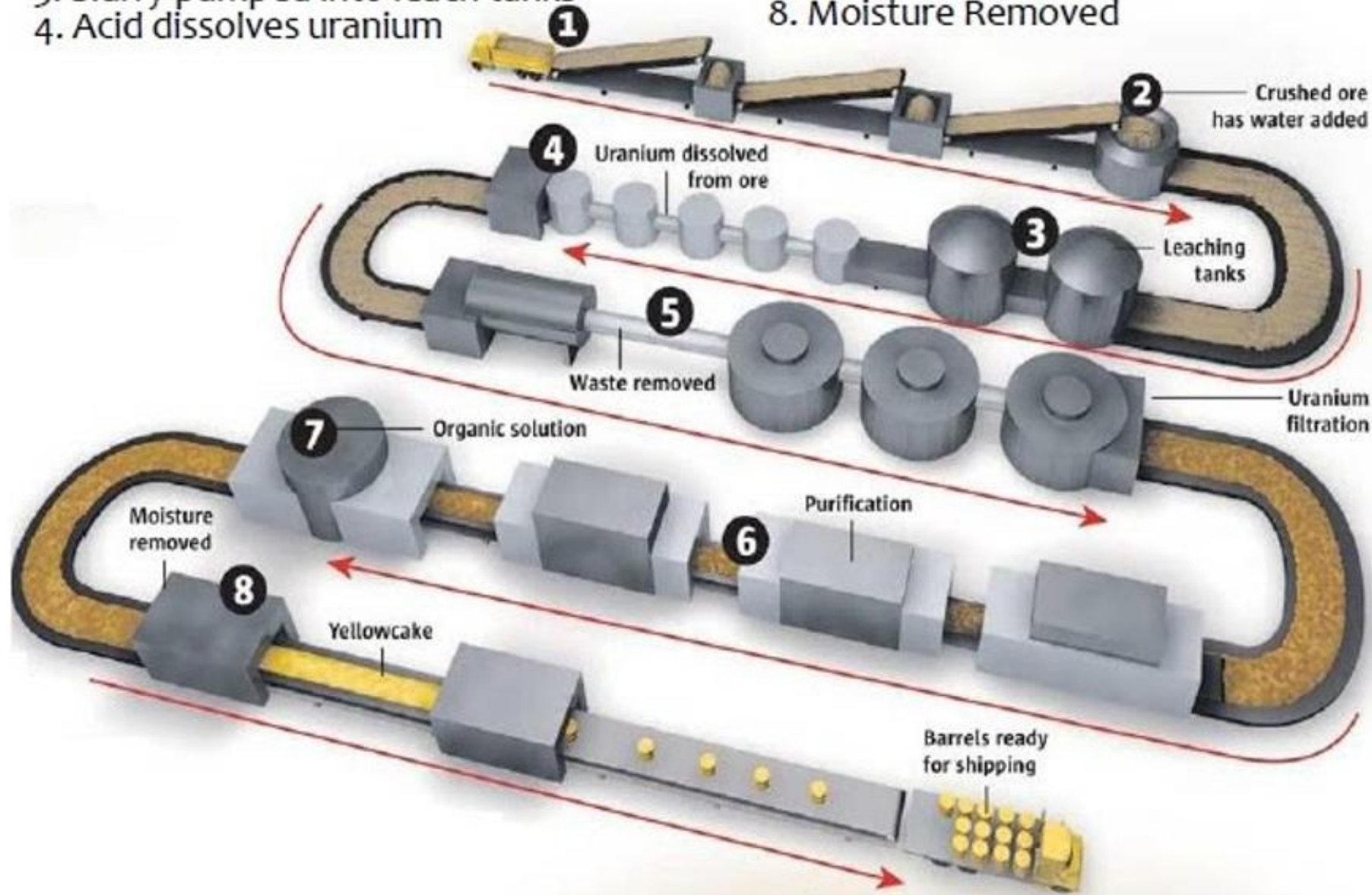
Milling



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



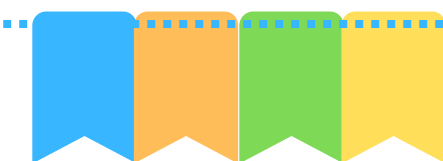
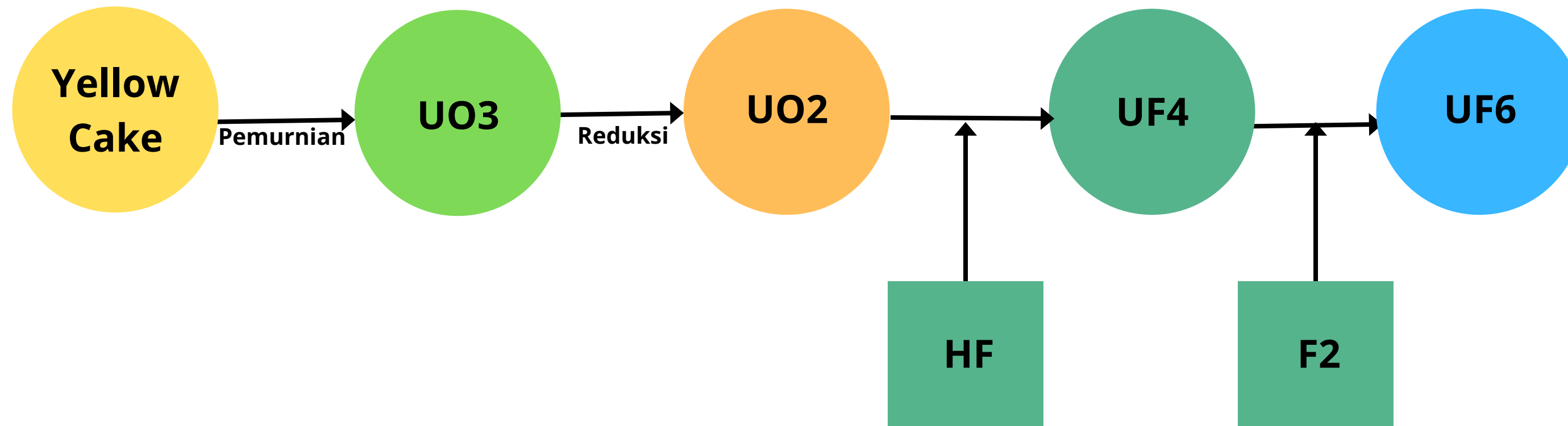
- Milling -> Ekstraksi uranium dari bijih
- Milling menghasilkan konsentrat uranium oksida (U_3O_8) yang dikenal dengan yellow cake. Kandungan uranium dalam yellow cake >80%



Conversion

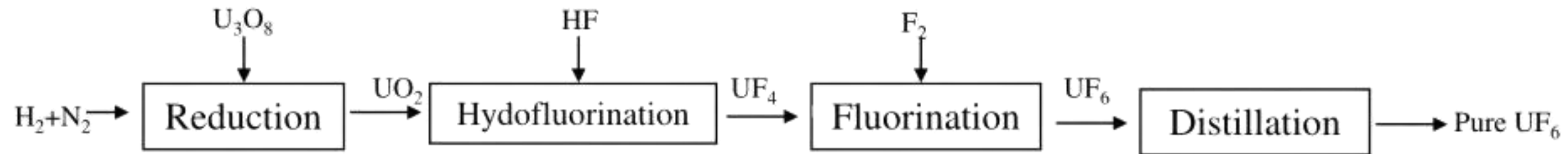
Tujuan:

Merubah **Yellow Cake** menjadi gas uranium hexafluoride (UF₆) atau serbuk UO₂ berderajat nuklir

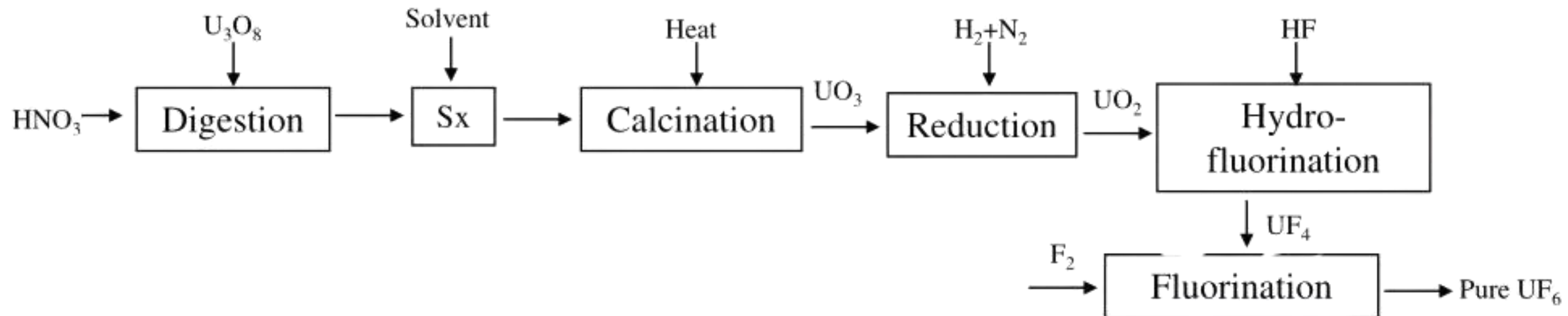


Conversion

Dry Hydrofluor Process



Wet Solvent Extraction Process



Enrichment



Apakah pengkayaan uranium itu?

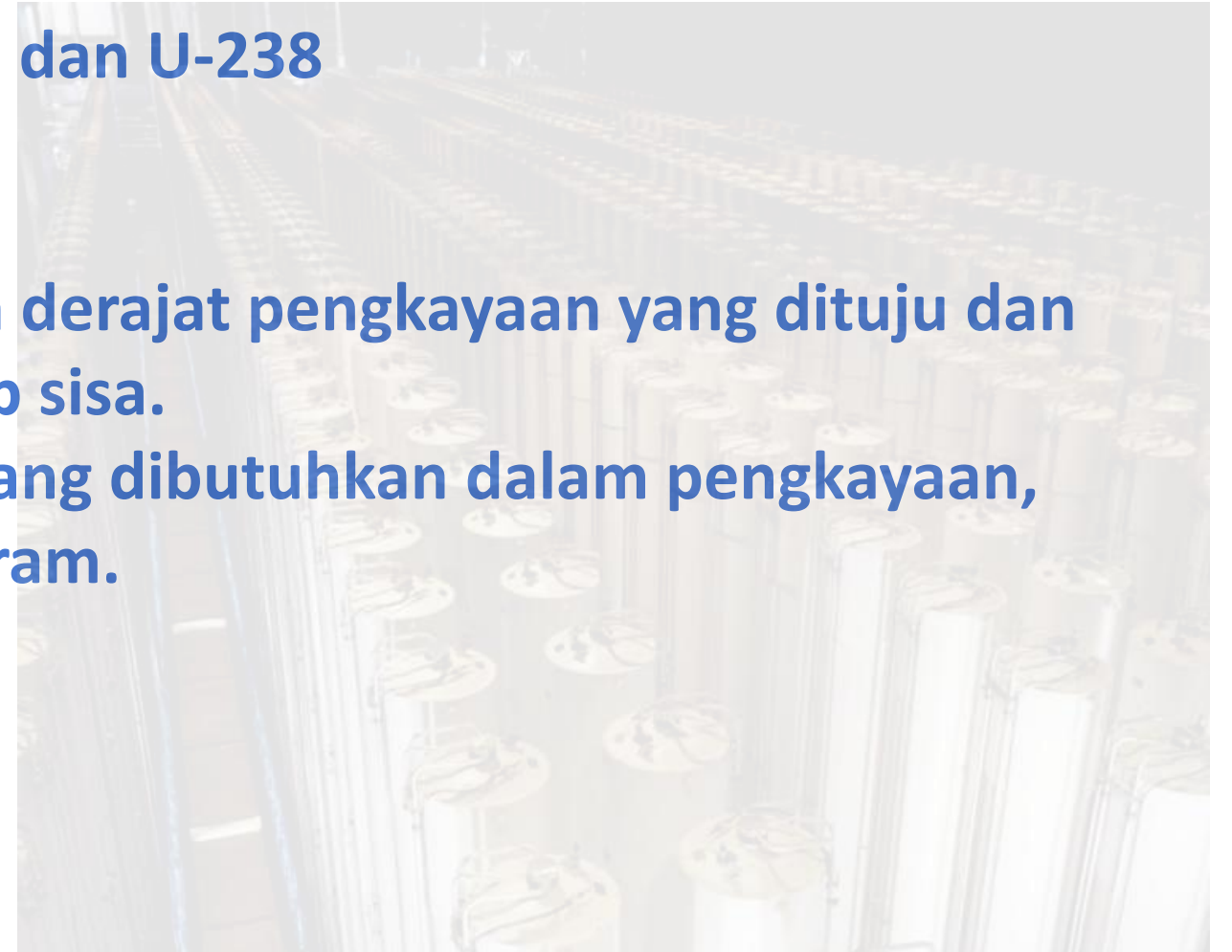
- Proses-proses kimia yang digunakan untuk meningkatkan presentase U-235
- Untuk light water reactor, proporsi U-235 di bahan bakar adalah 3-5 %
- Untuk senjata nuklir, proporsi U-235 paling sedikit 90%

Dasar pengkayaan uranium

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

Seperative Work Unit (SWU)

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



Enrichment

Gaseous diffusion

- Prinsip

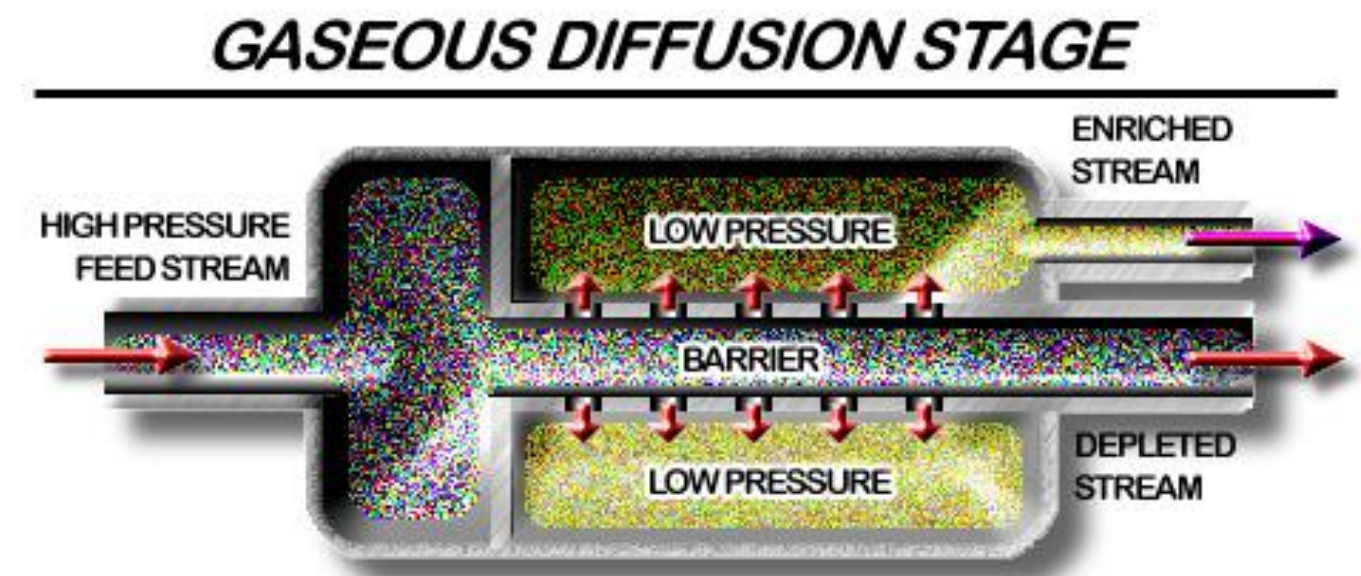
- Berdasar pada efusi molekul

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



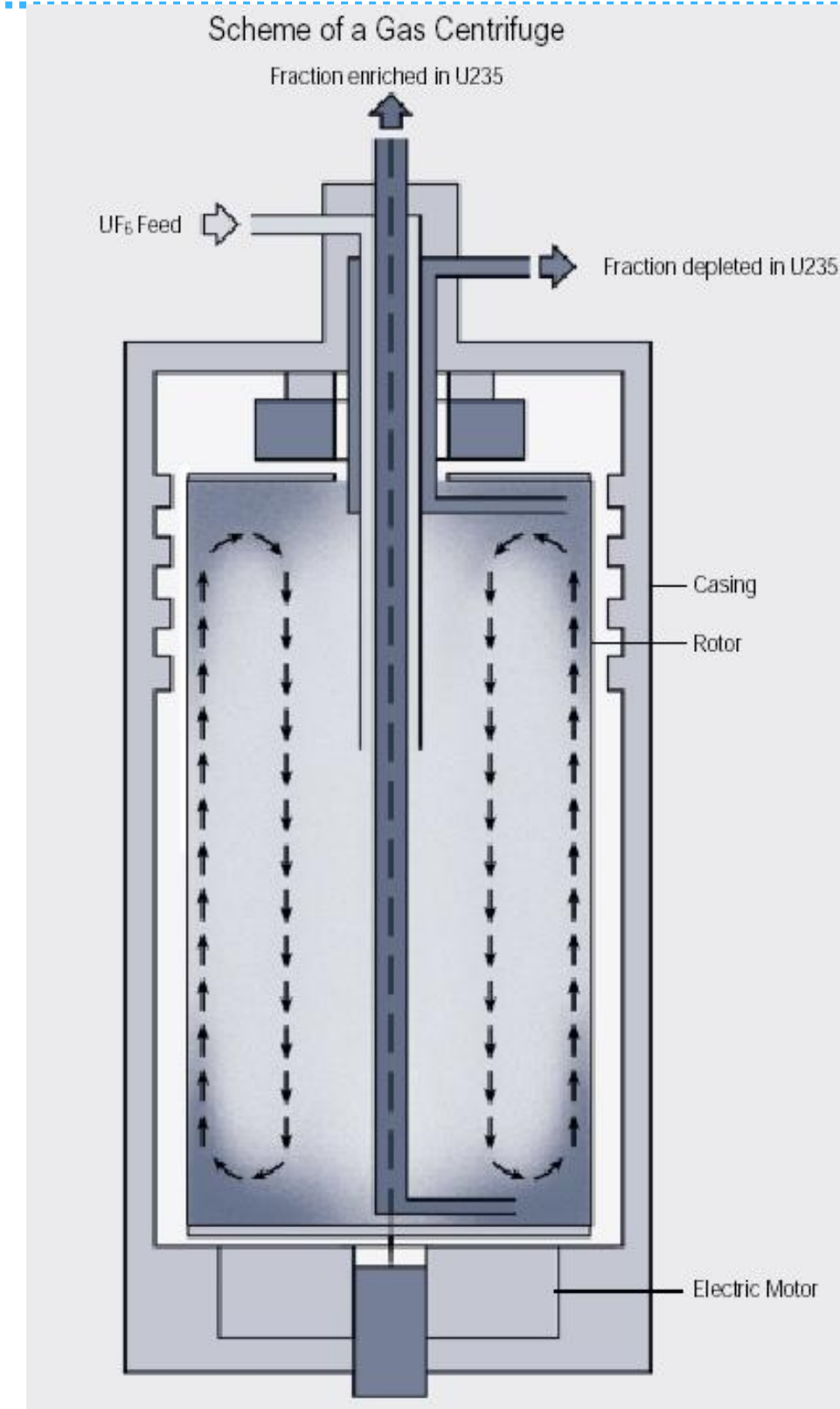
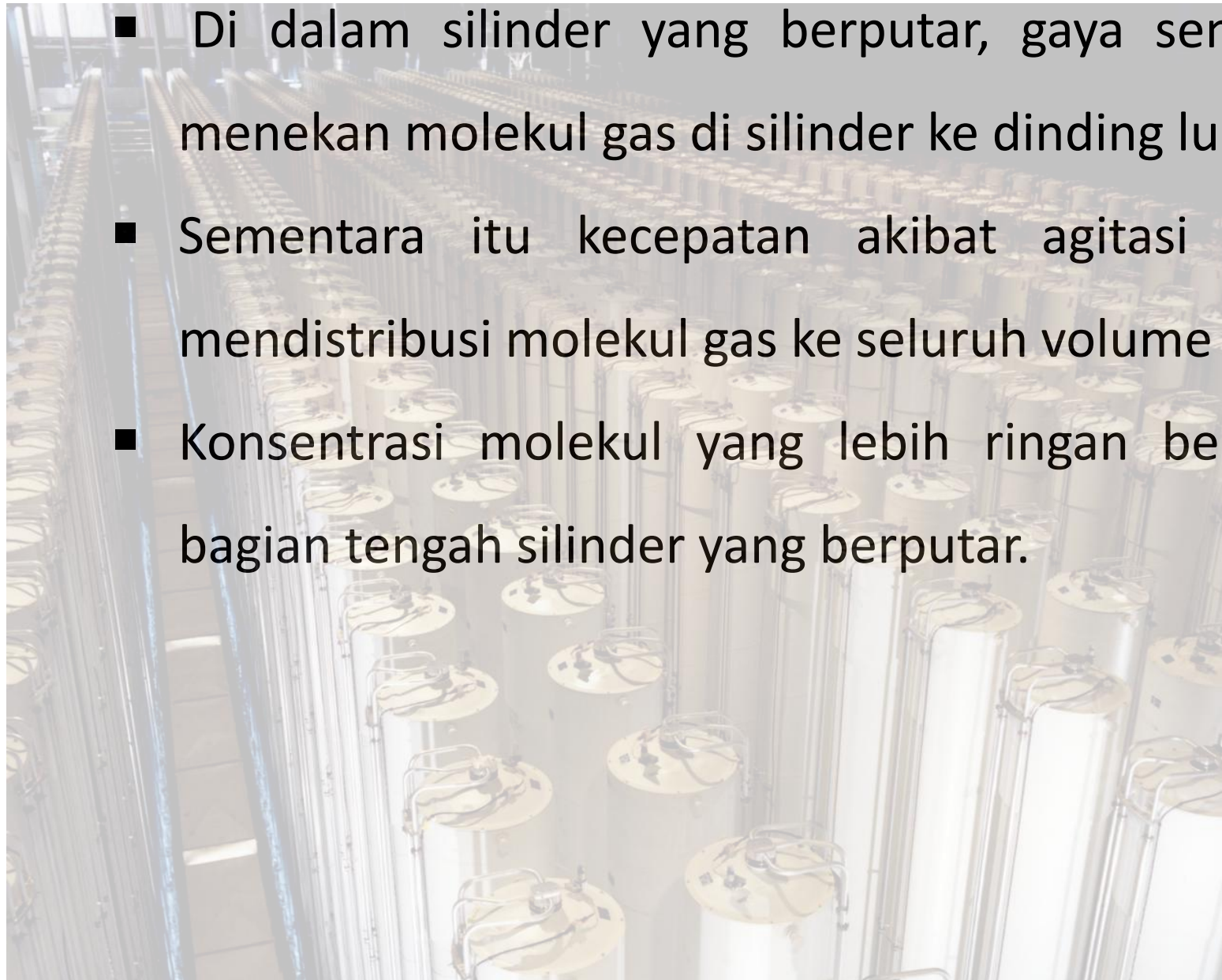
Sumber: <https://www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-gaseous.htm>

Enrichment

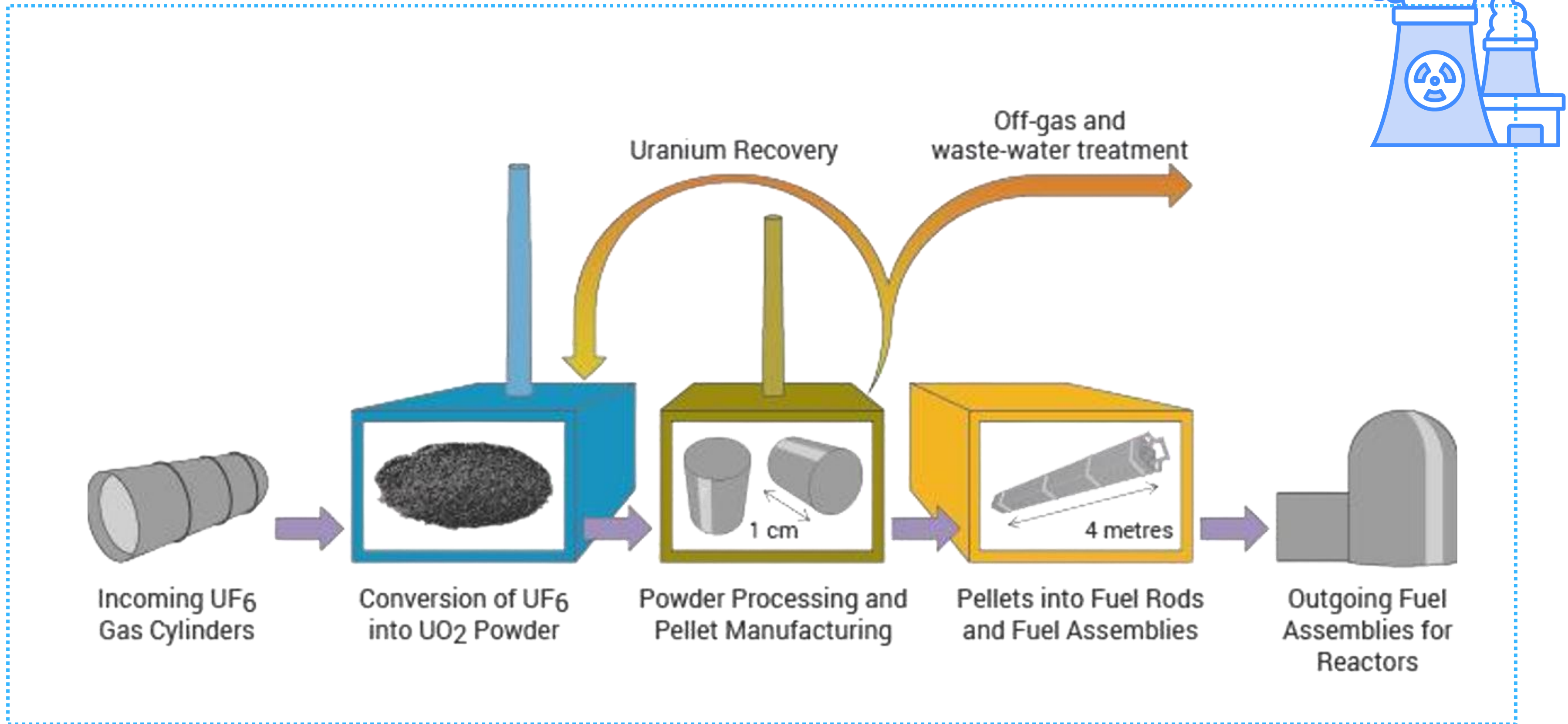
- **Gaseous Centrifuge**

- **Prinsip**

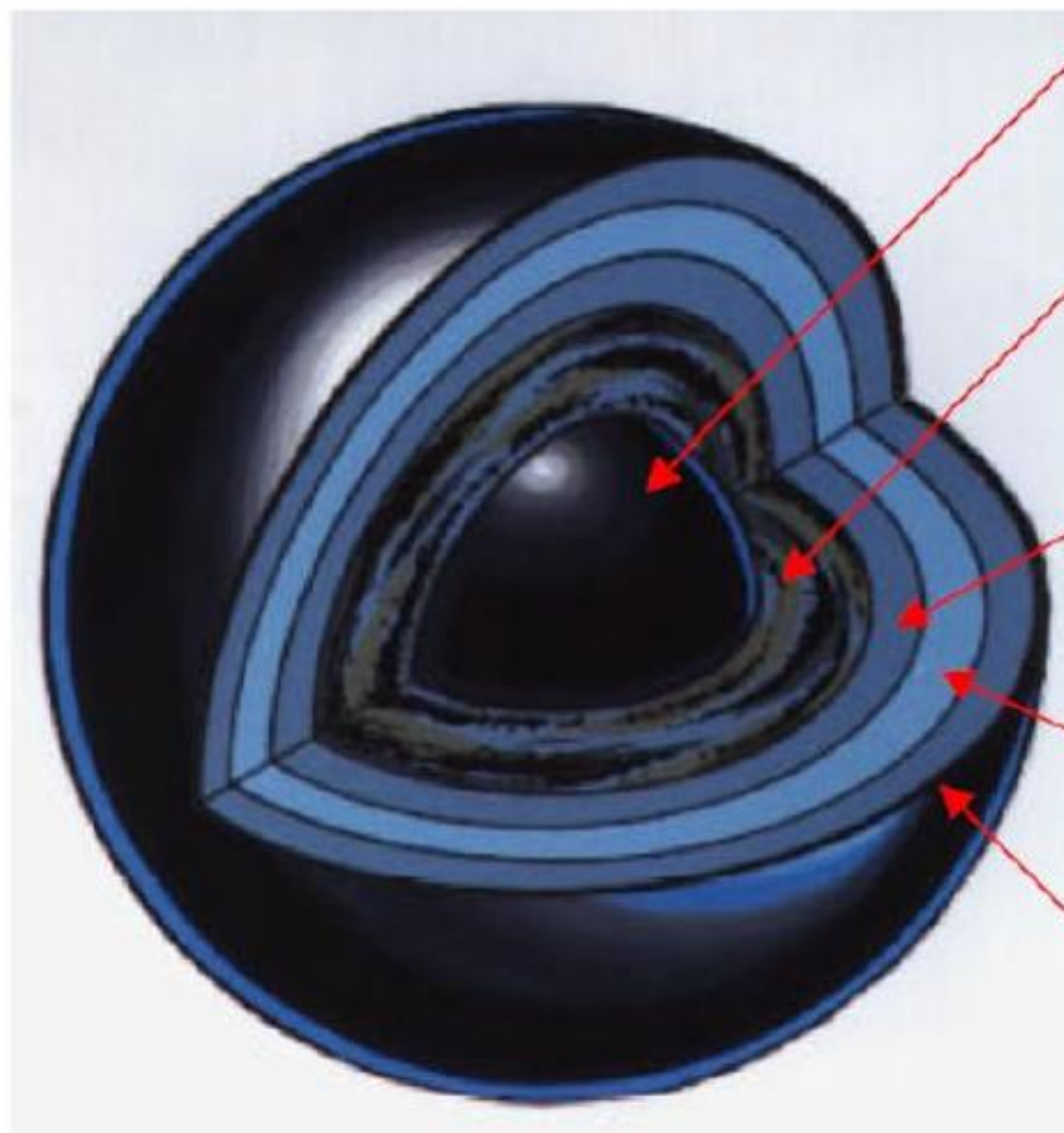
- Di dalam silinder yang berputar, gaya sentrifugal cenderung menekan molekul gas di silinder ke dinding luar
- Sementara itu kecepatan akibat agitasi termal cenderung mendistribusi molekul gas ke seluruh volume silinder.
- Konsentrasi molekul yang lebih ringan berkumpul di sekitar bagian tengah silinder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



Fabrication



Fabrication



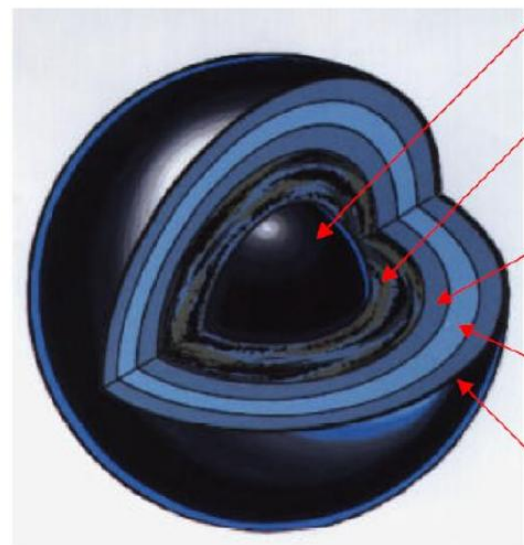
- Fuel Kernel
 - Provide fission energy/destroy Pu/MA
 - Retain fission products
- Buffer layer (porous carbon layer)
 - Attenuate fission recoils
 - Void volume for fission gases
- Inner Pyrocarbon (IPyC)
 - Provide support for SiC during manuf. and irradi.
 - Prevent Cl- attack of kernel during SiC 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

Sumber: IAEA techdoc 1645

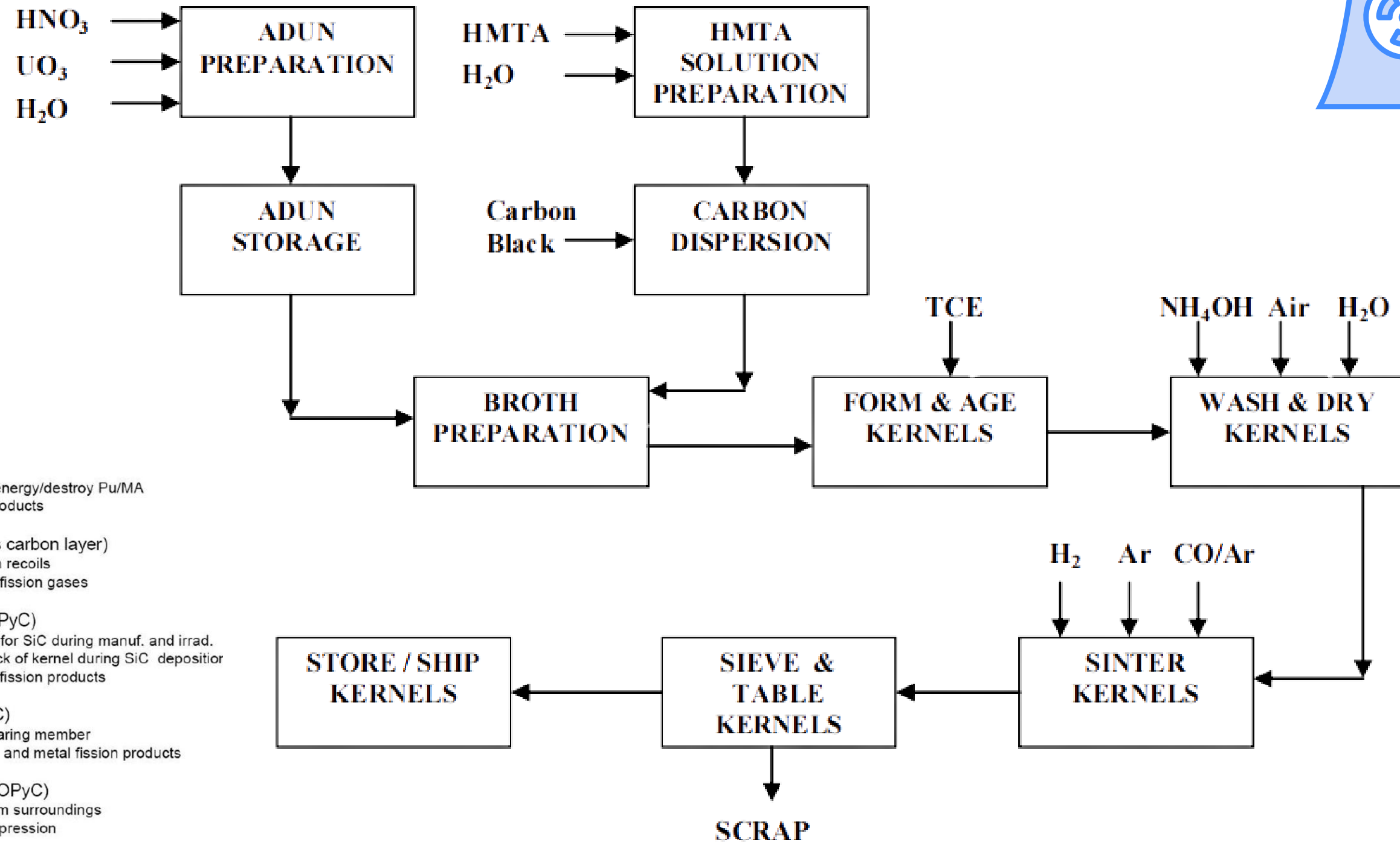


Fabrication

Kernel Fabrication Process



- 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



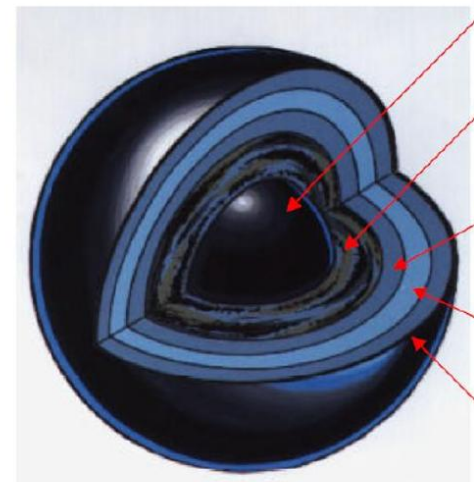
Sumber: IAEA techdoc 1645



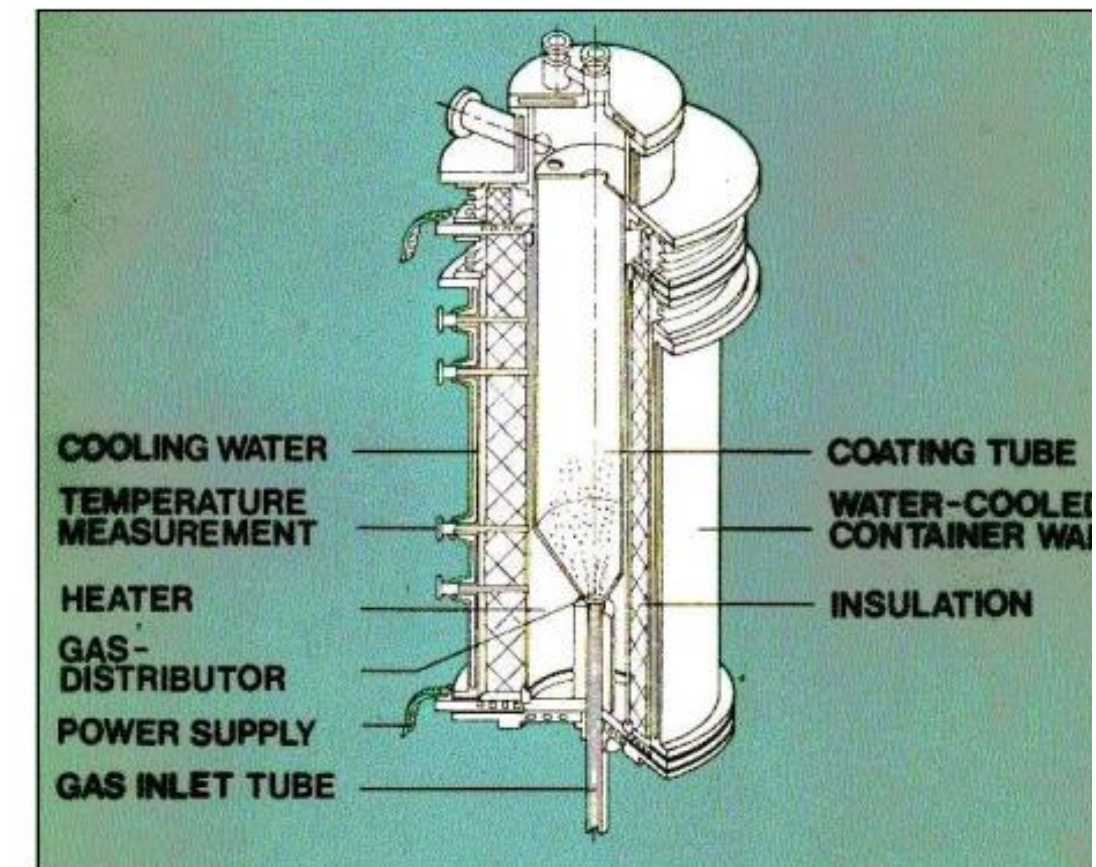
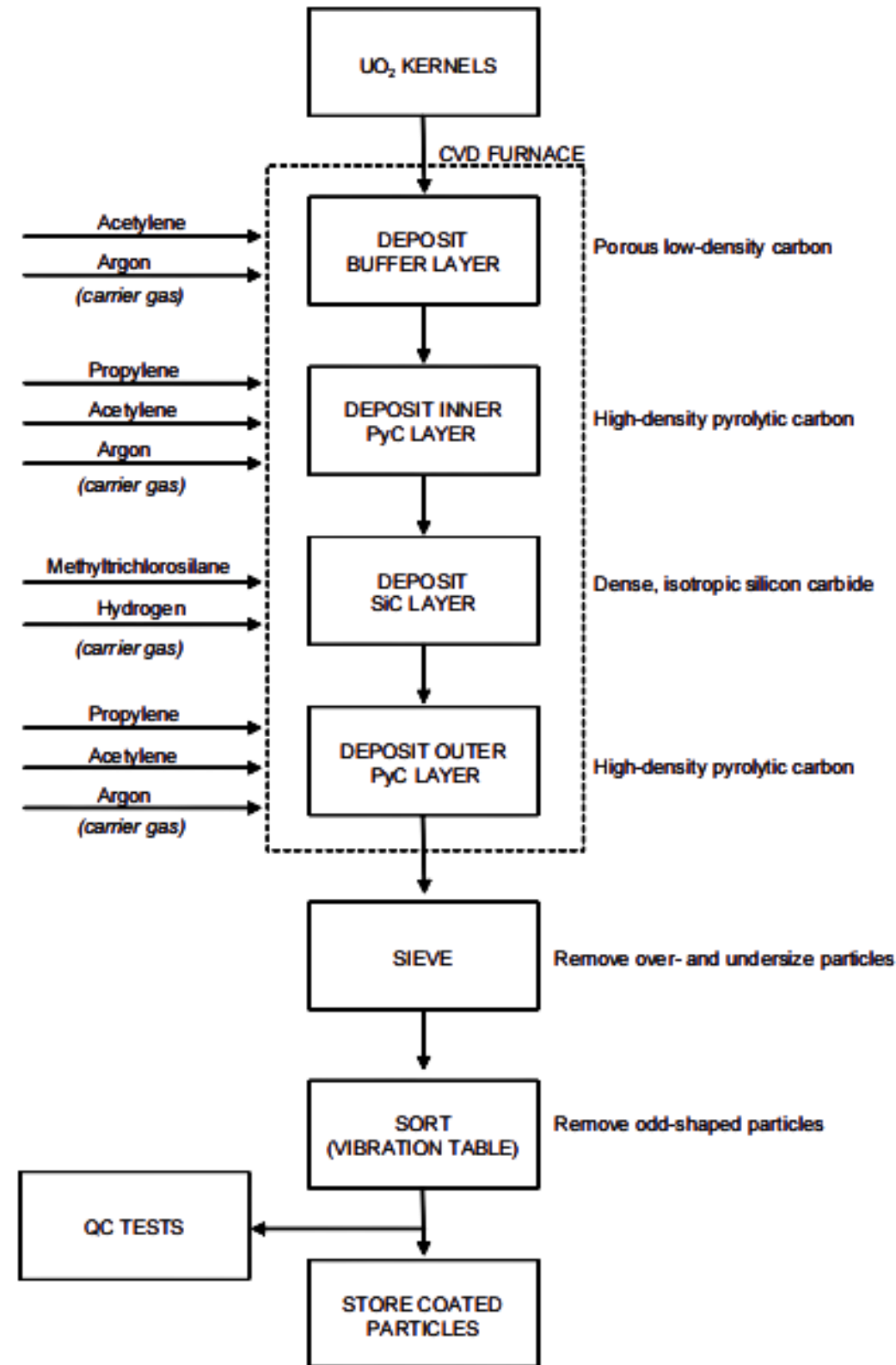
Fabrication



Coating Process



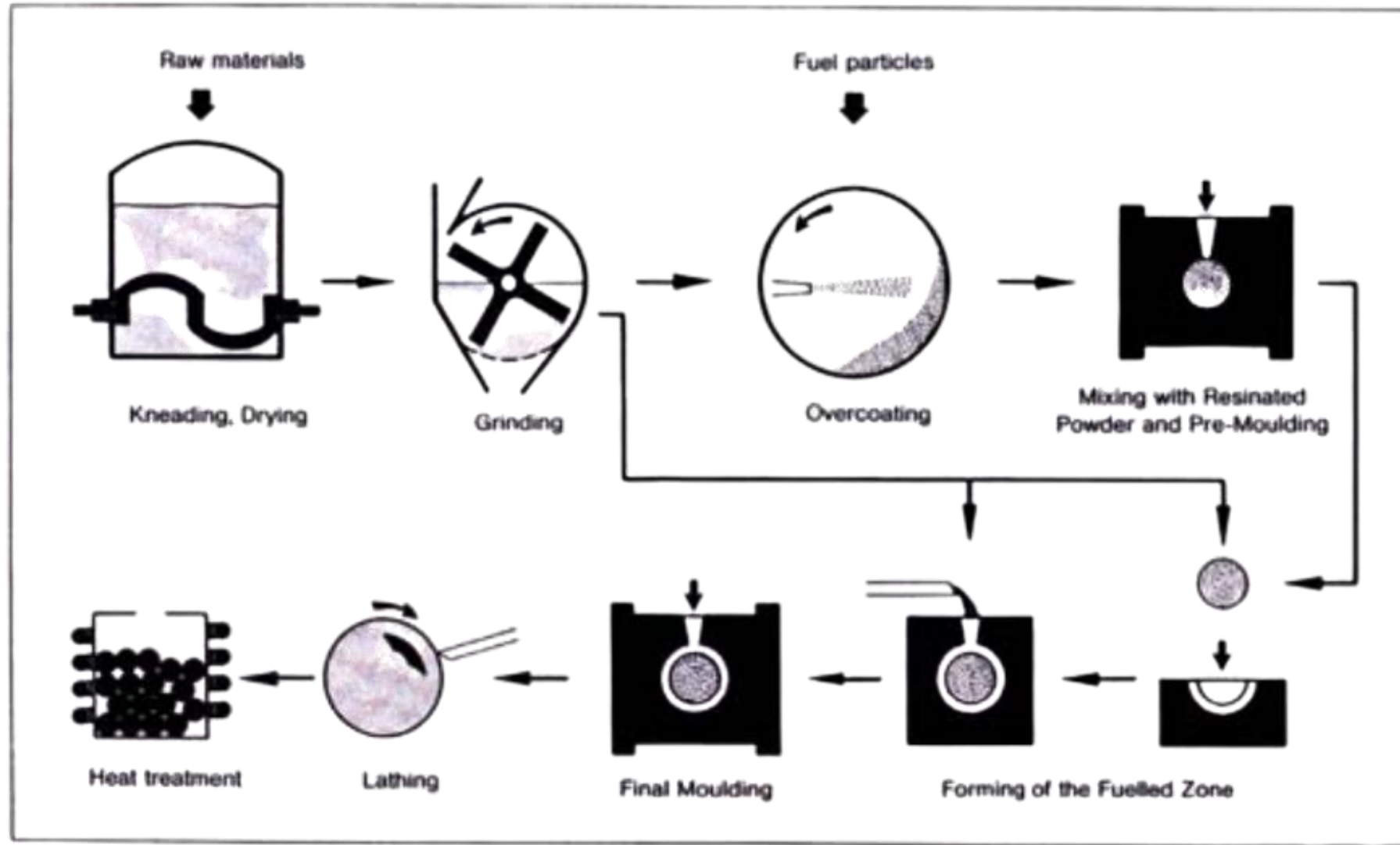
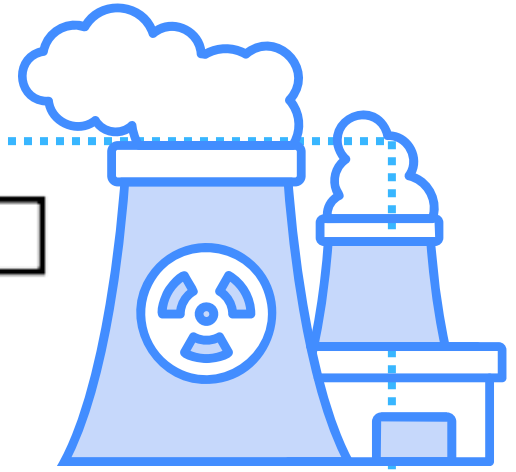
- Fuel Kernel
 - Provide fission energy/destroy Pu/MA
 - Retain fission products
- Buffer layer (porous carbon layer)
 - Attenuate fission recoils
 - Void volume for fission gases
- Inner Pyrocarbon (IPyC)
 - Provide support for SiC during manuf. and irradi.
 - Prevent Cl- attack of kernel during SiC depositor
 - 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



Sumber: IAEA techdoc 1645

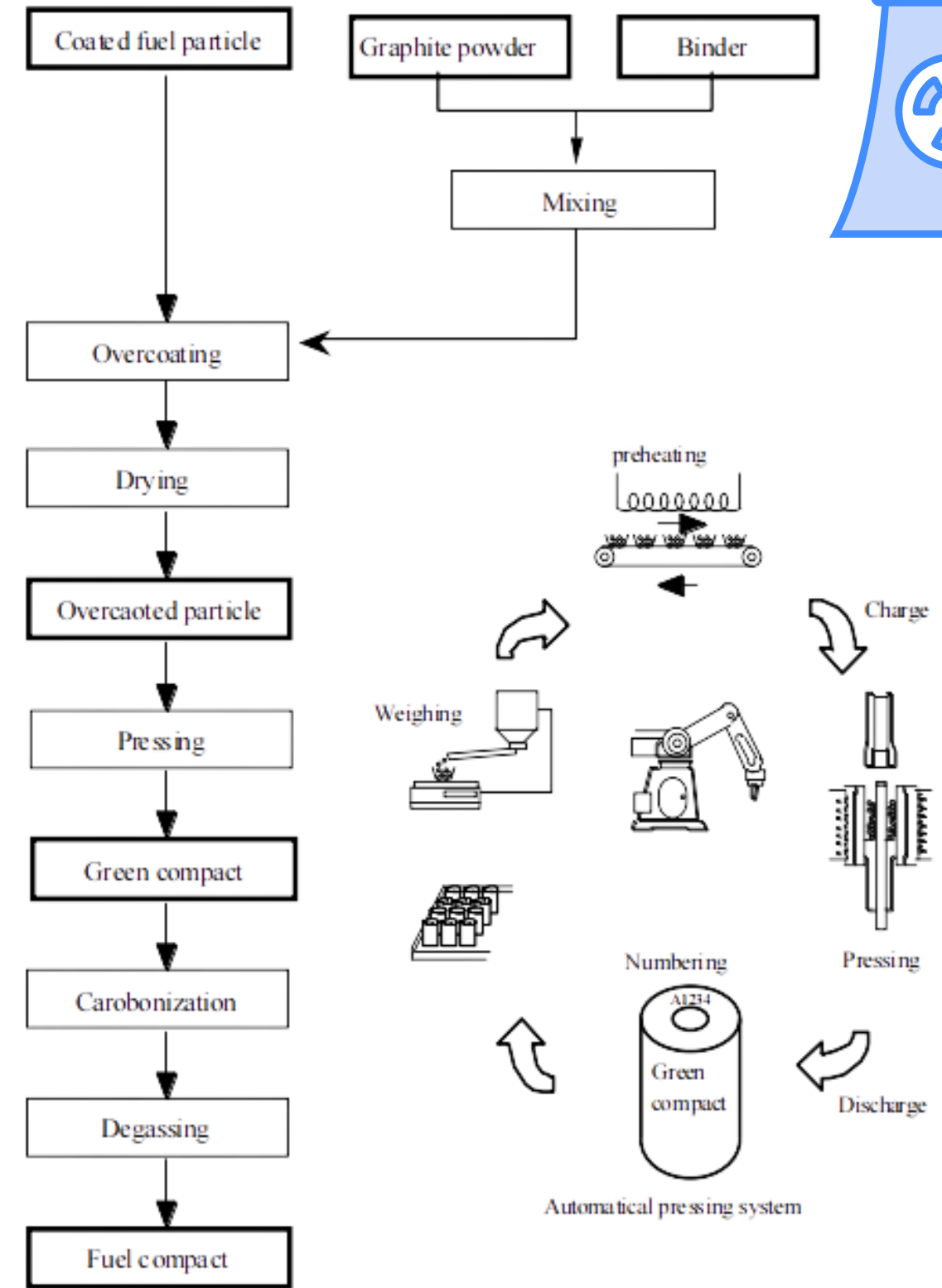


Fabrication



According to M. Hrovat, H. Nickel, K. Koizlik: KFA-Report, Jül - 969 - RW, 1973

Sumber: IAEA techdoc 1645



Fabrication

Quality Control



Uji kualitas antara lain densitas, rasio O/U, luas permukaan, kekasaran permukaan, analisis kimia/impuritas, mikrostruktur (grain, porositas), kebocoran



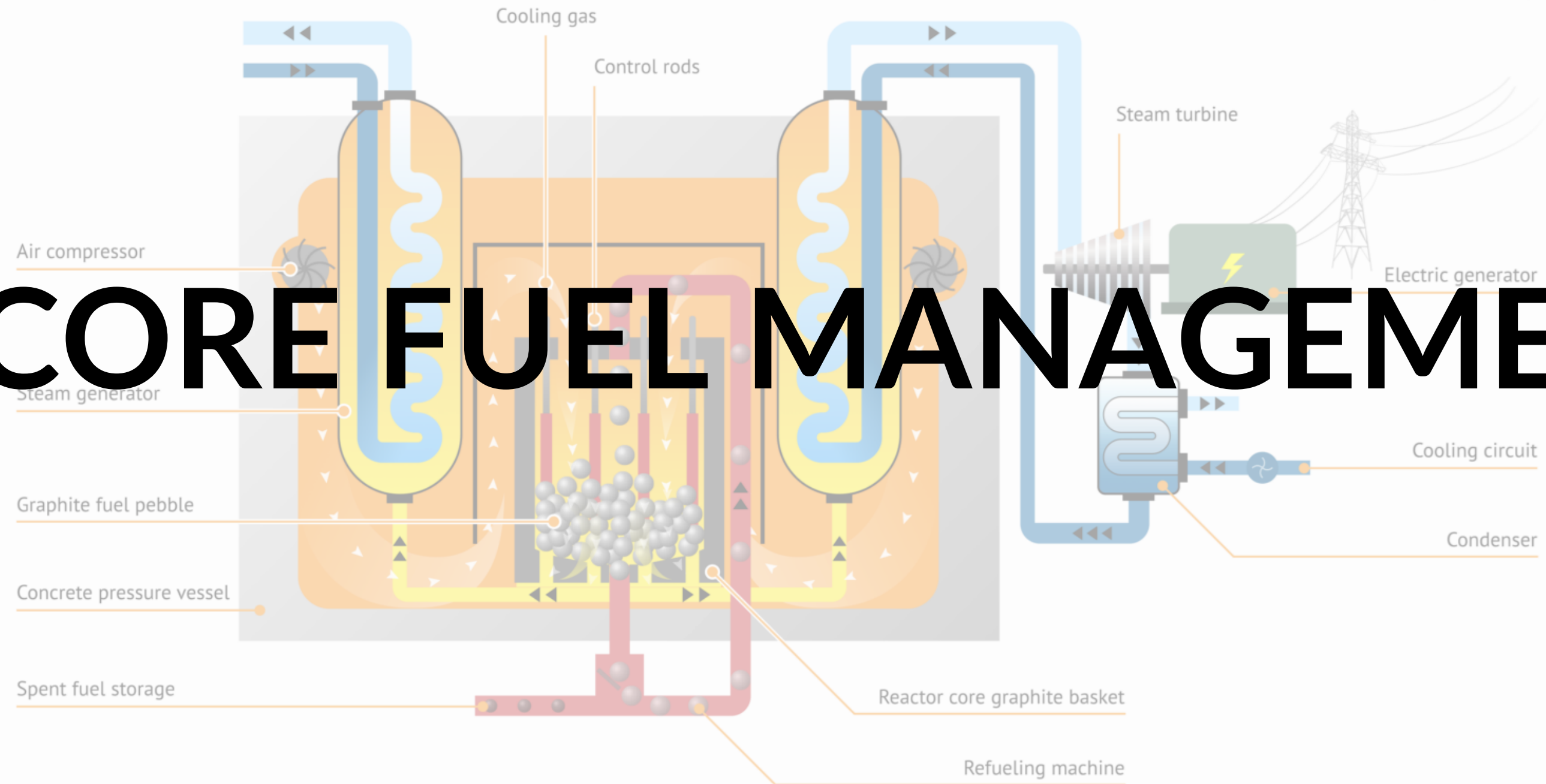
Persyaratan Bahan & Produk

- Uranium alam (*yellow cake*)
- Bahan struktur & dukung : zirkaloi, grafit, berilium
- Serbuk UO_2
- Pelet (mentah & sinter)
- Pin
- Berkas

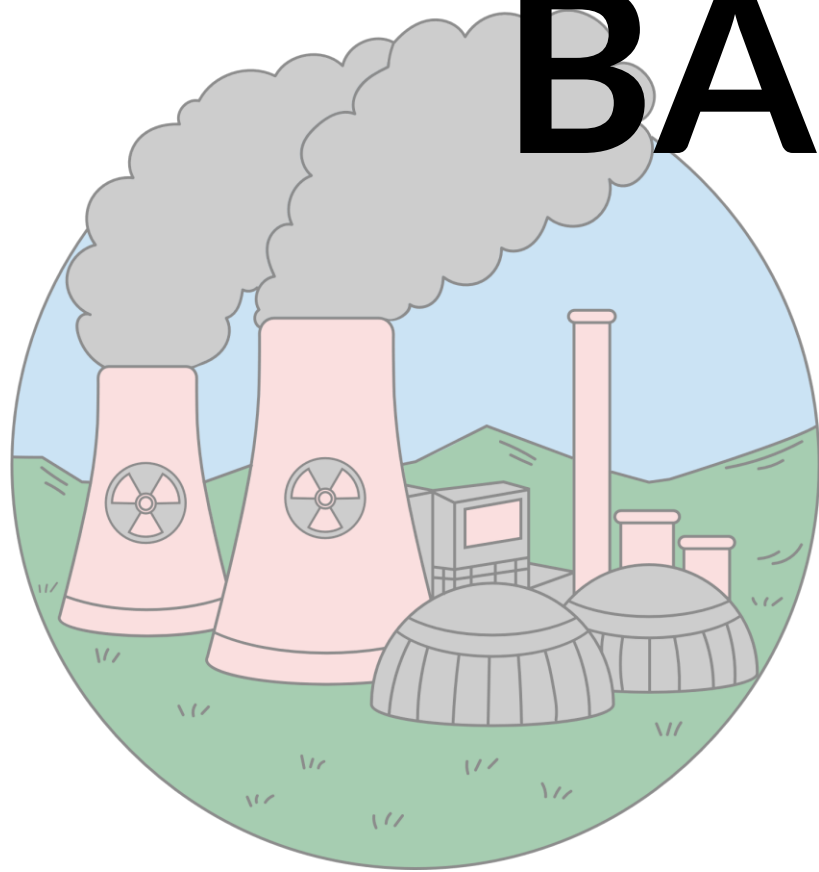


High Temperature
Reactor (HTGR)

IN CORE FUEL MANAGEMENT



BACK END ACTIVITIES



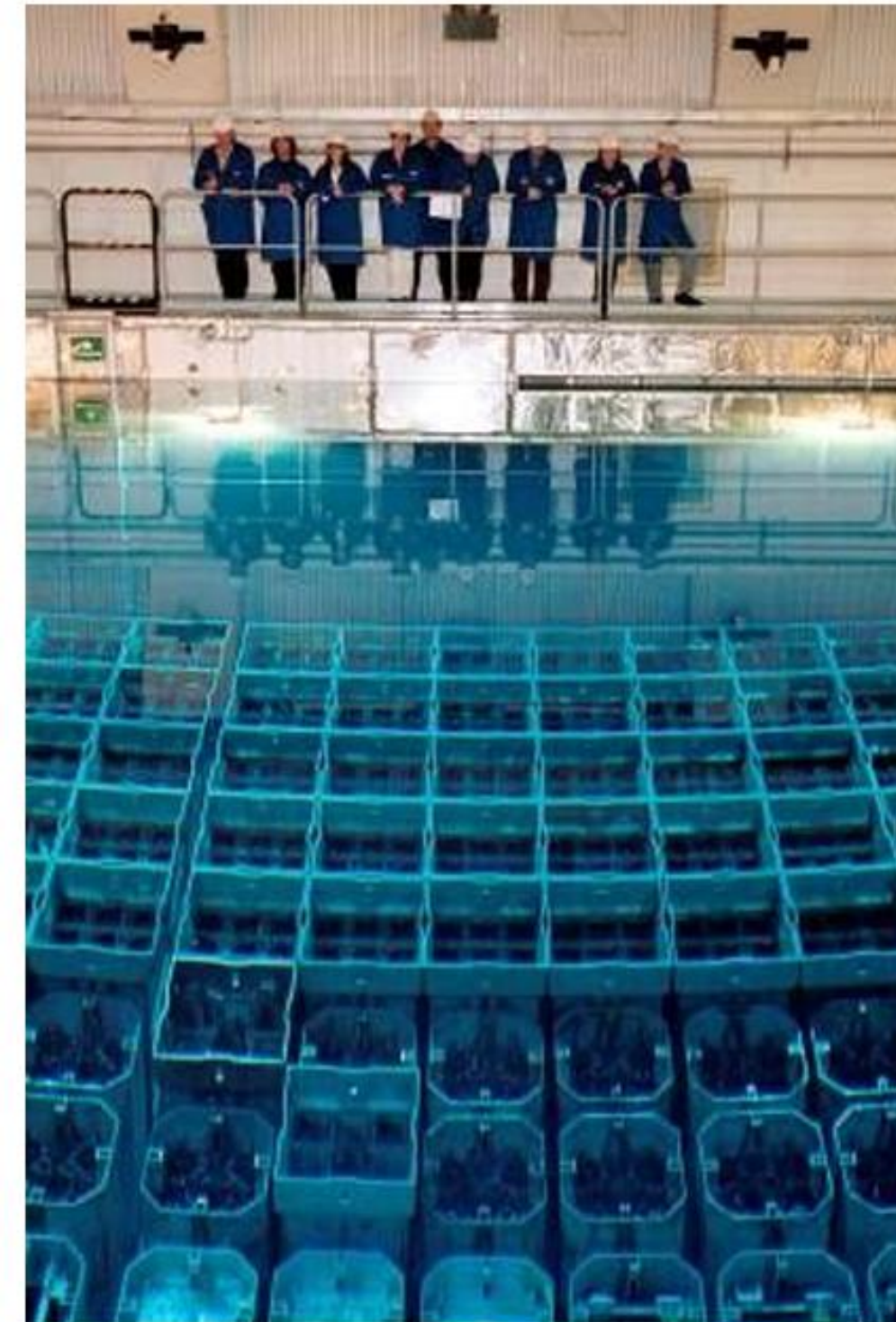
Waste Management

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.

Opsi untuk bahan bakar bekas

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



Waste Management

○ Tanpa reprocessing

Penyimpanan



Transportasi



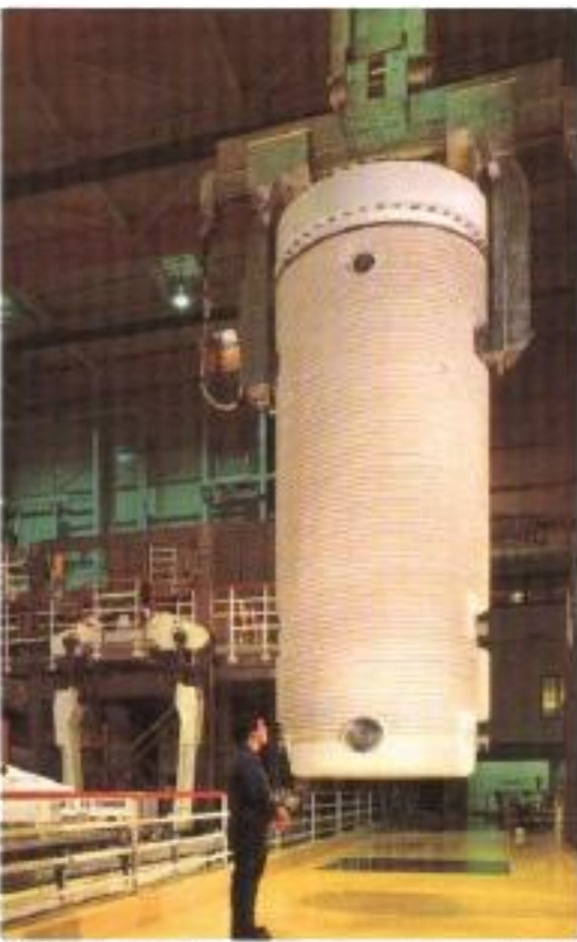
Penyimpanan



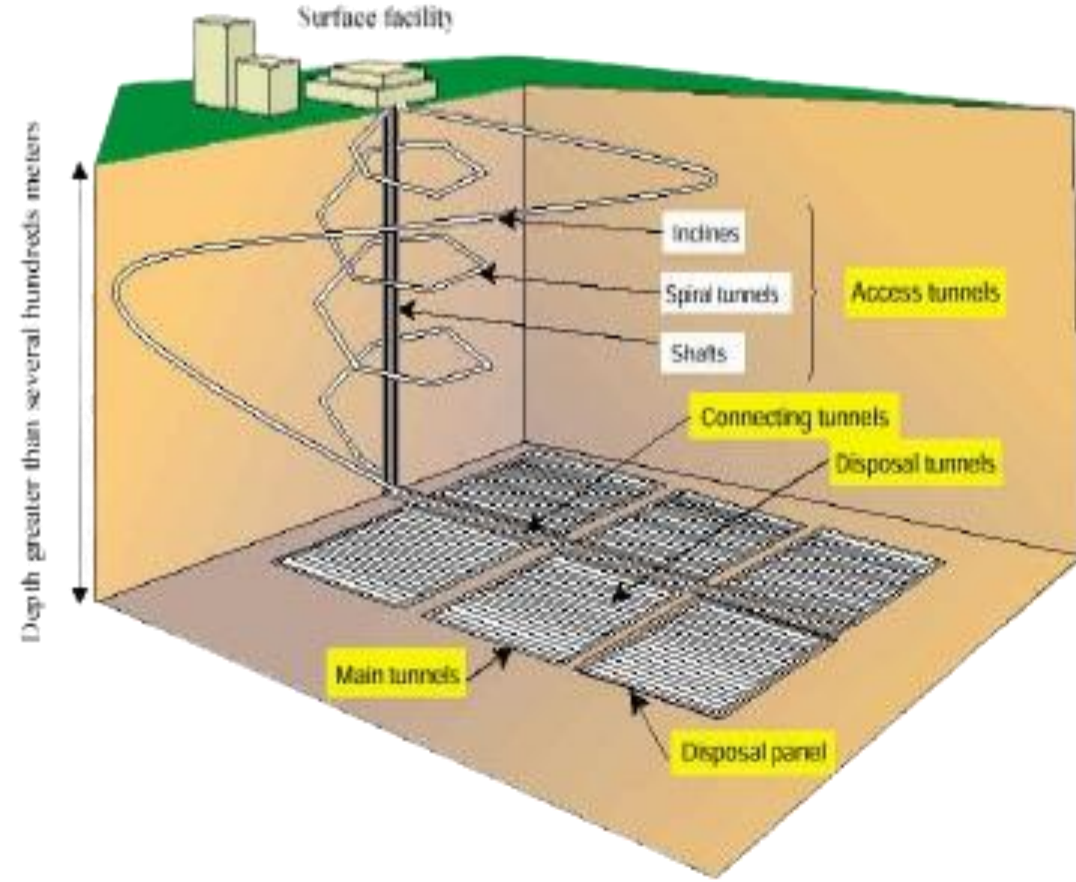
Penyimpanan basah



Penyimpanan kering



Spent fuel Cask

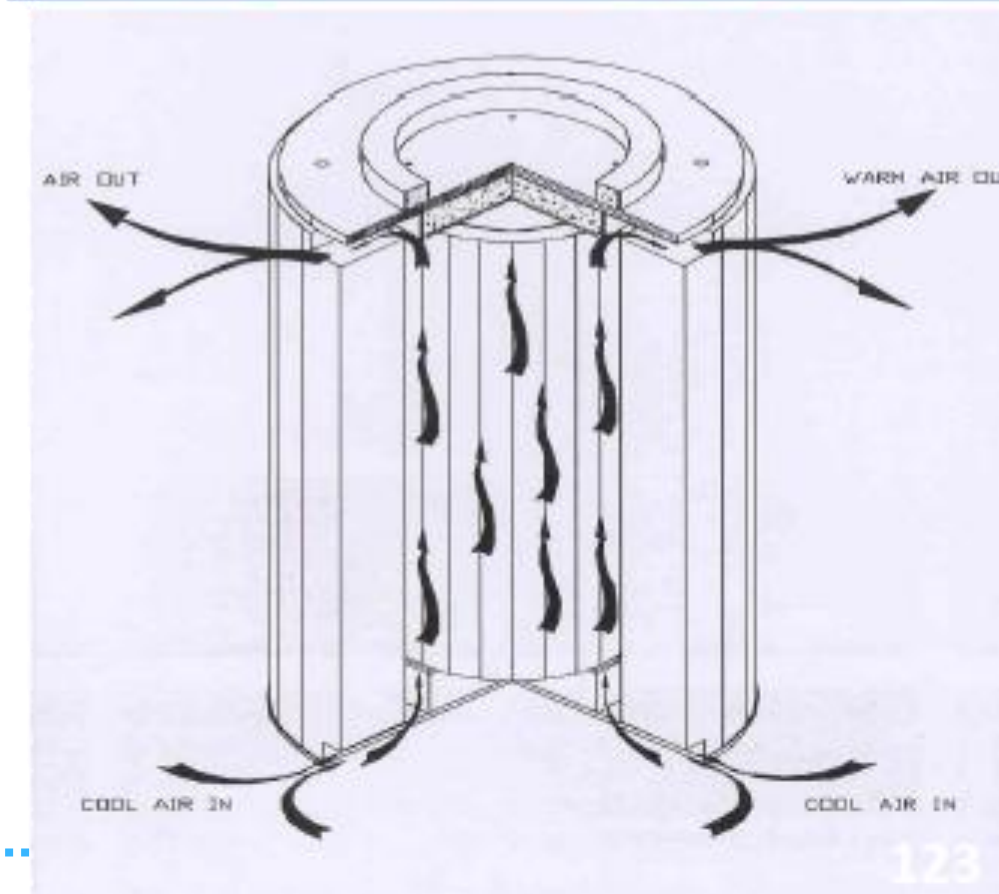


Penyimpanan bawah tanah



Waste Management

- 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.



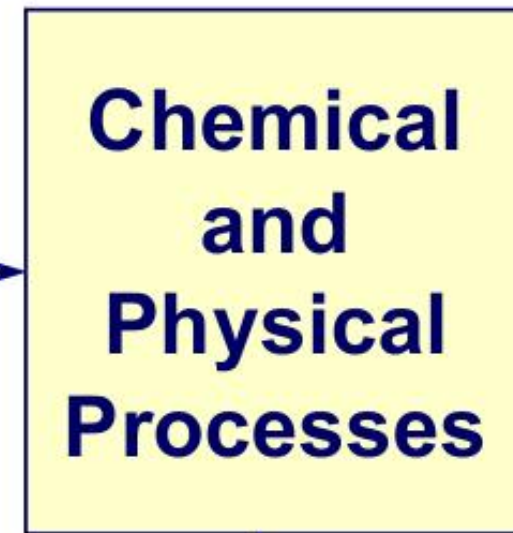
Waste Management



Waste Management- Reprocessing



Spent Fuel



**U
Pu**

Waste



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



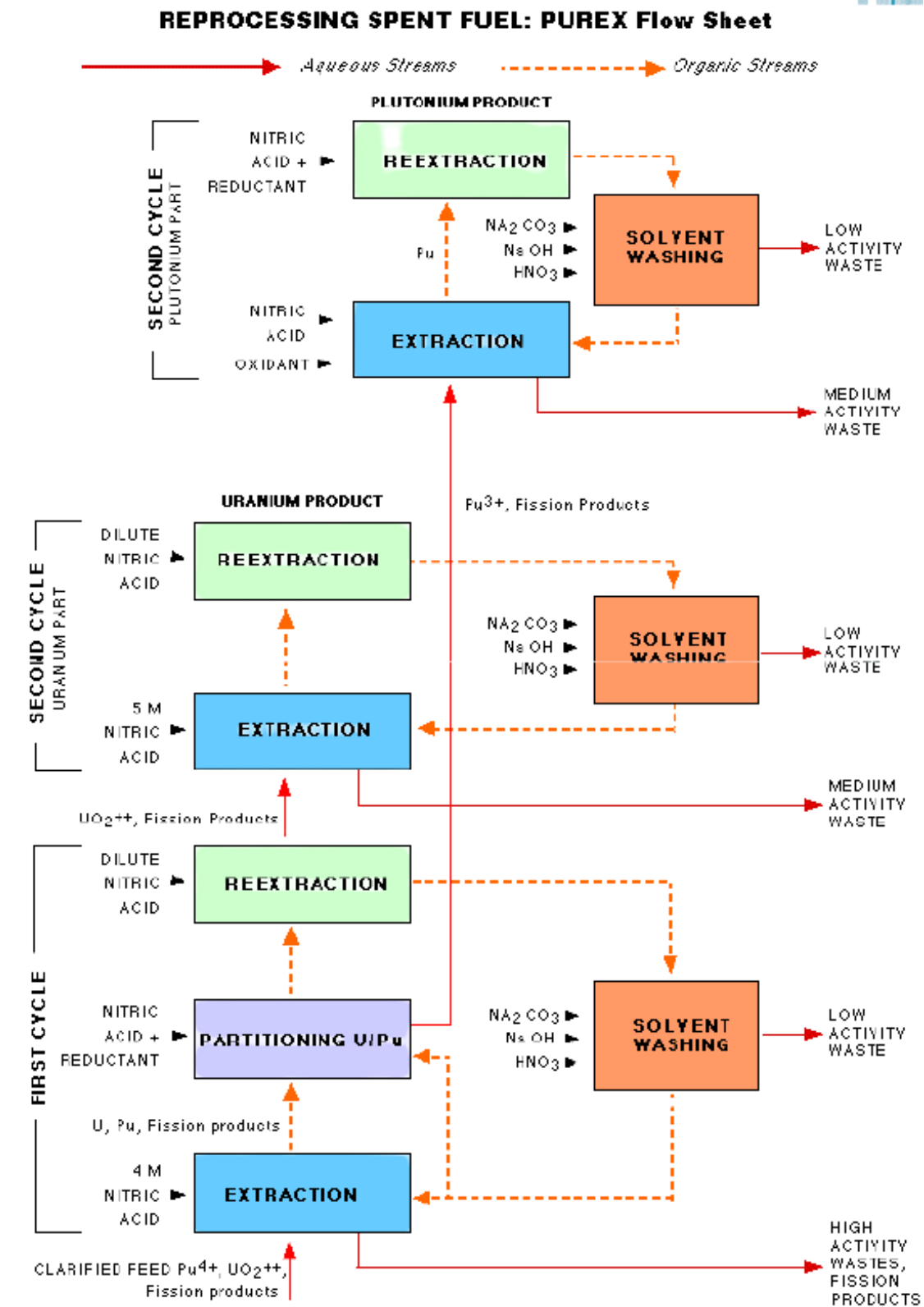
Waste Management- Reprocessing



PUREX

Plutonium Uranium Refining by Extraction

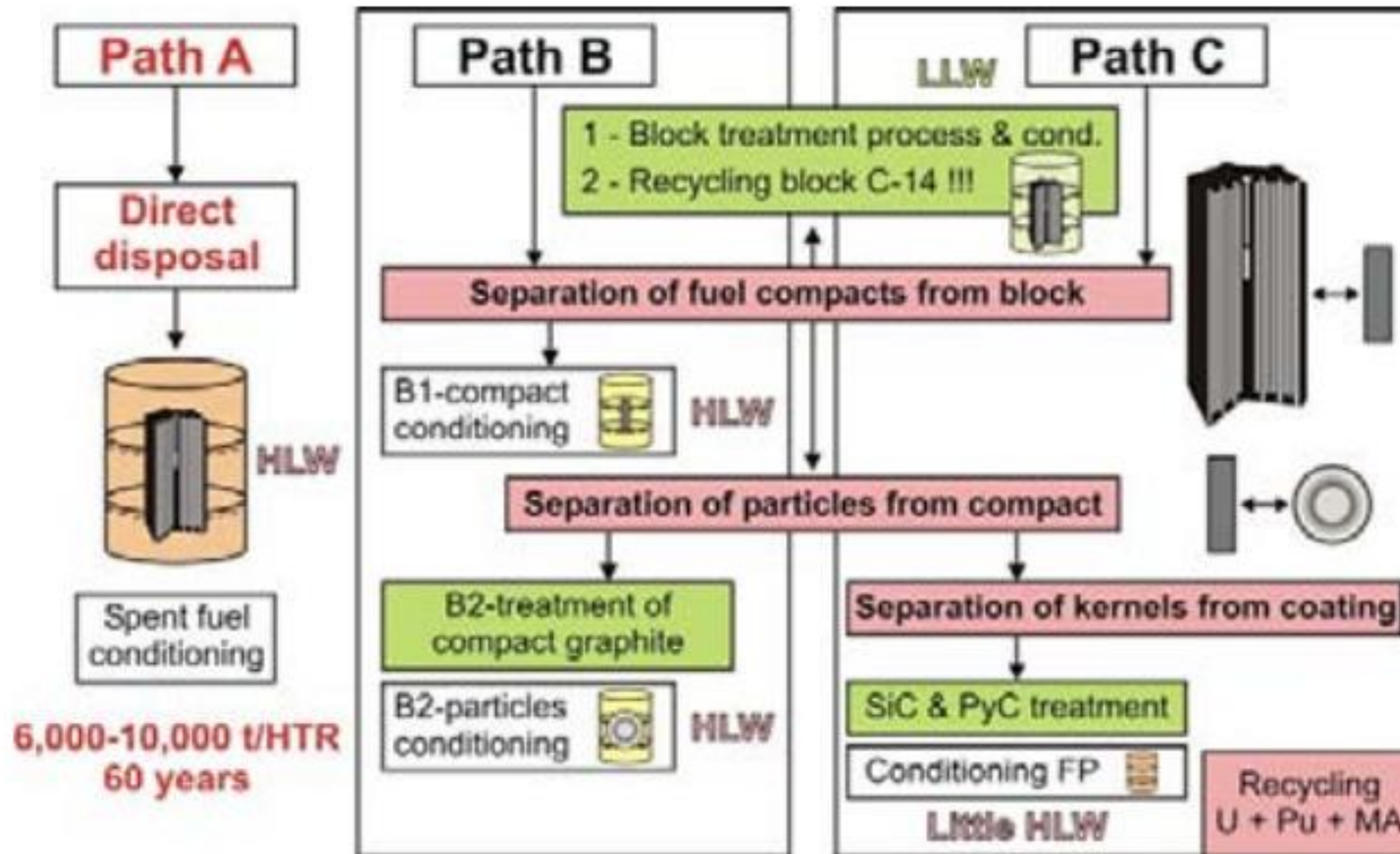
- Untuk memisahkan uranium dan plutonium dari produk fisi.
- 30% tributyl fosfat (TBP) dalam kerosen digunakan sebagai pelarut organik



WASTE MANAGEMENT

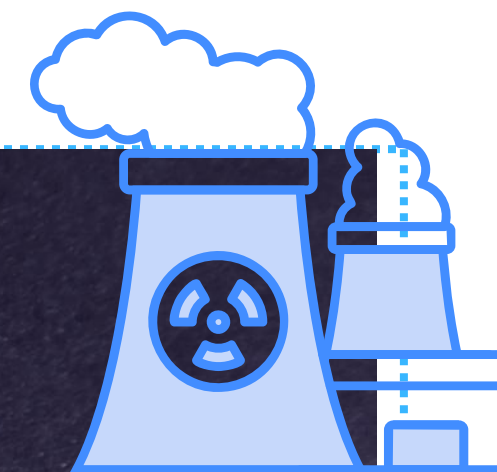


Opsi Back End untuk Bahan Bakar HTGR



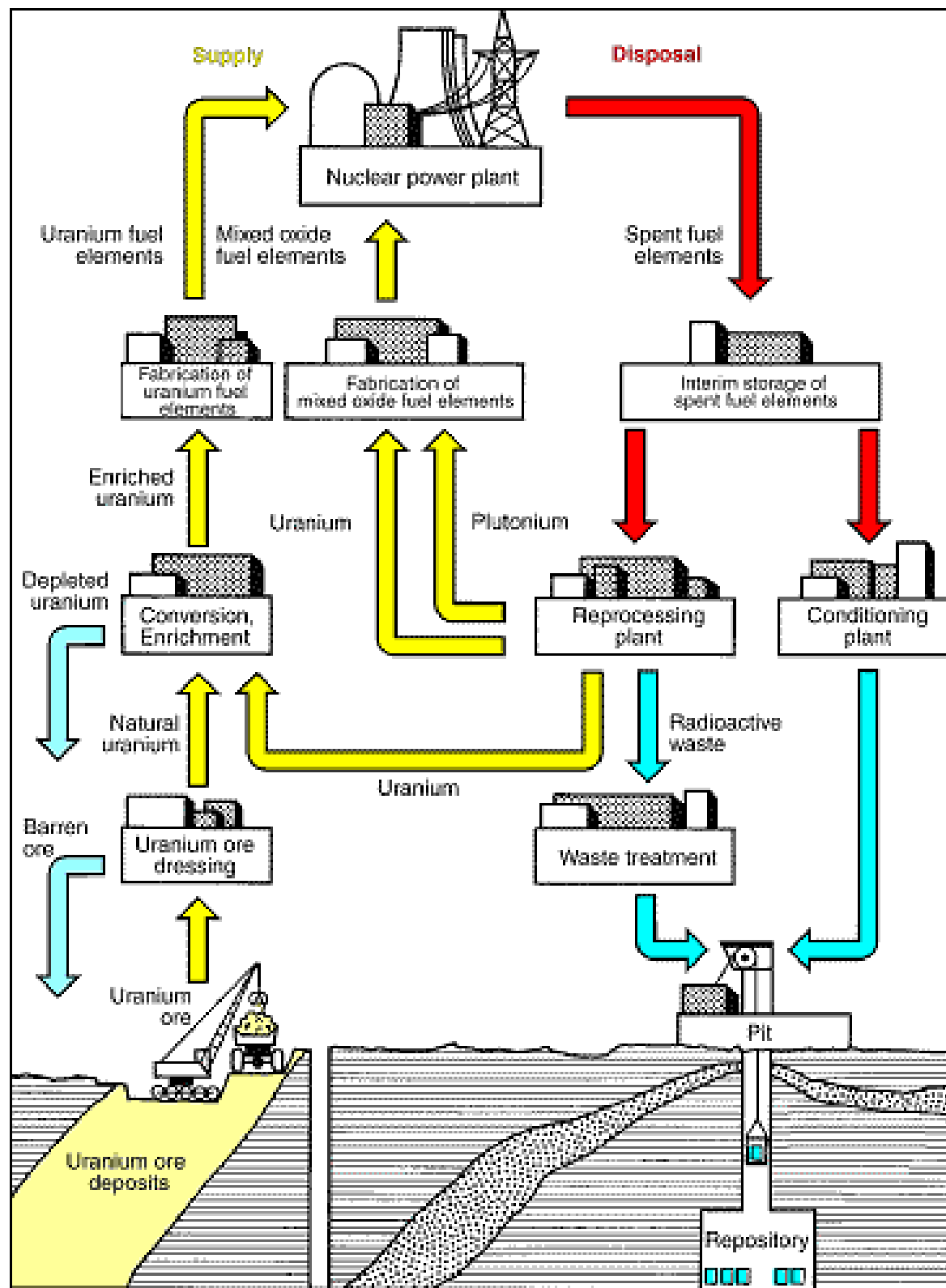
Sumber: IAEA techdoc 1645





CONCLUSION





- Nuclear Fuel Cycle => Proses Kompleks
- Nuclear Fuel Cycle bertujuan untuk menjamin pasokan energi nuklir (sustainability)
- Pemilihan opsi Fuel Cycle dipengaruhi beberapa faktor diantaranya teknis, ekonomis, lingkungan, dll.
- Dalam pelaksanaannya, memerlukan teknologi dan keselamatan yang tinggi.

Terima kasih

