

PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR: MENUJU *ZERO RELEASE NUCLEAR WASTE*



PROF. ABDUL WARIS

***KK FISIKA NUKLIR DAN BIOFISIKA
FMIPA - ITB***

**ORASI ILMIAH
FORUM GURU BESAR**

**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
JUM'AT, 14 MARET 2025**

OUTLINE

2

1. Pengantar
2. Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN)
3. Pengelolaan bahan bakar dan limbah nuklir:
Menuju Zero Release Nuclear Waste
4. Penutup

1. PENGANTAR

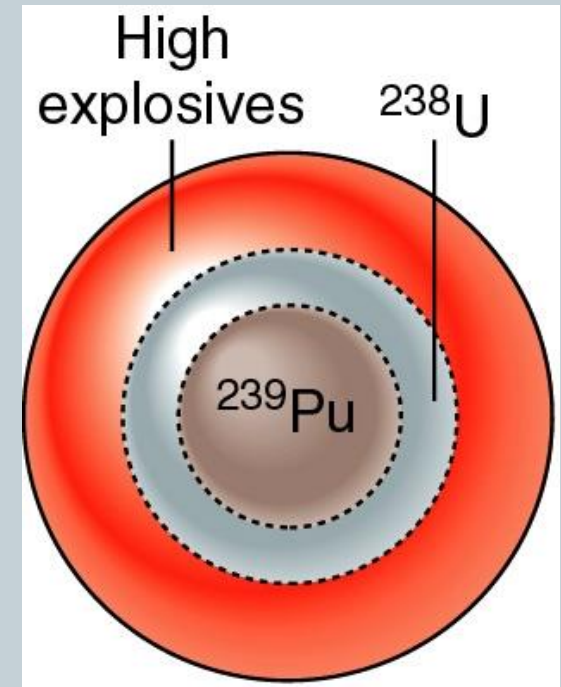
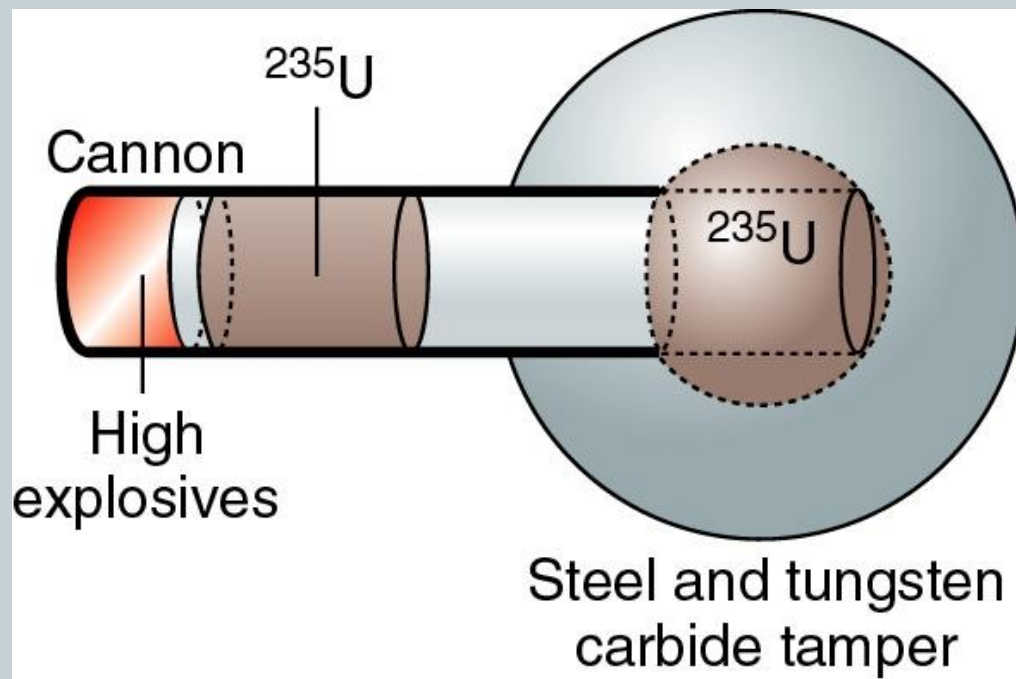
3

**ADA APA DENGAN
NUKLIR ?...**

Nuklir ?...

4

- Kalau kita bicara “nuklir” mungkin yang terbayang adalah “bom atom” di Hiroshima dan Nagasaki

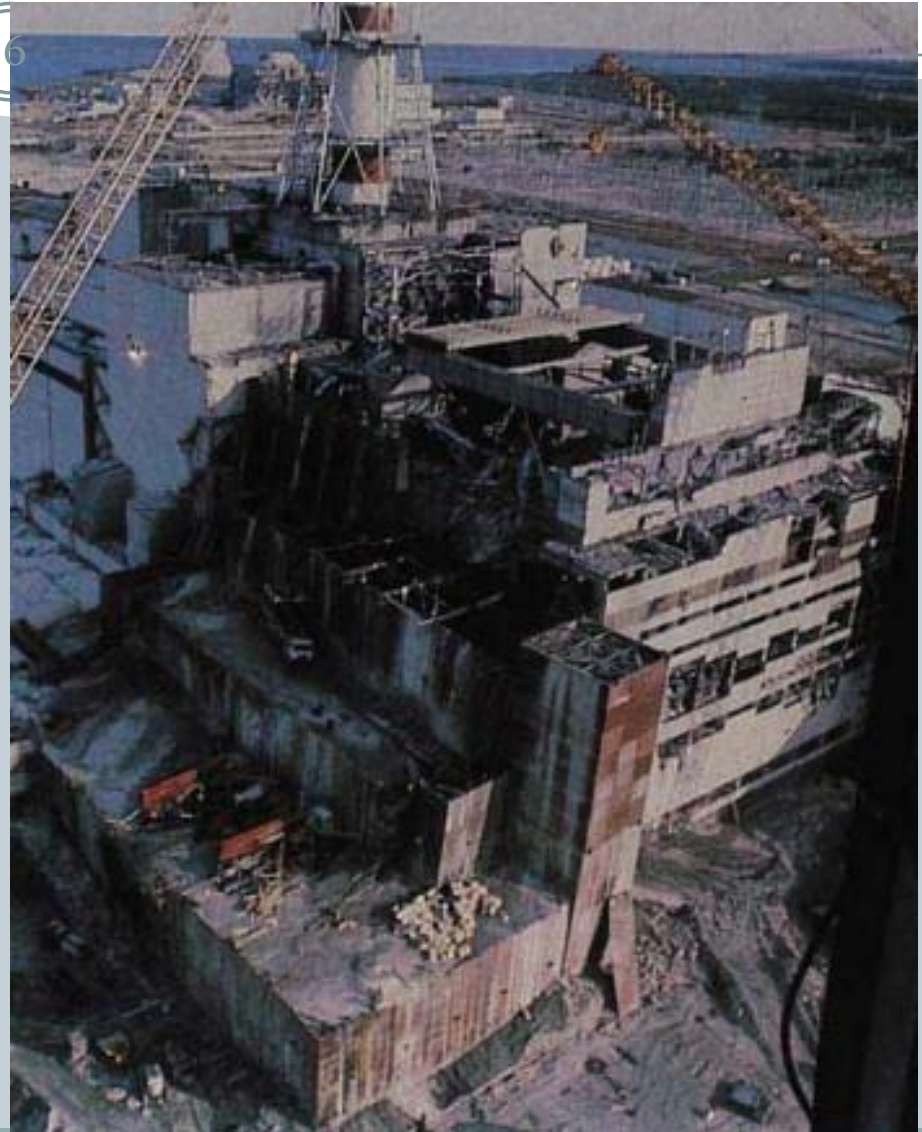
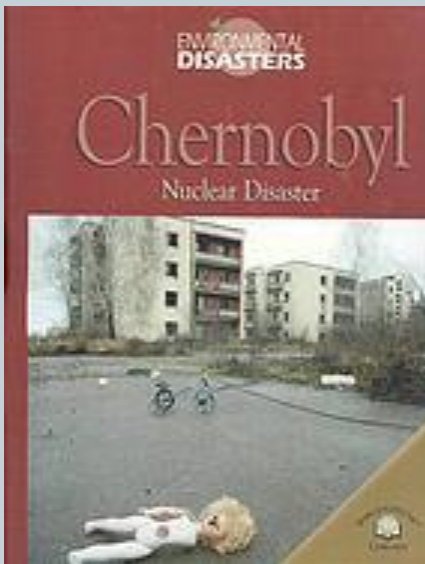


A photograph of the atomic bombing of Nagasaki on August 9, 1945. The image shows a massive, bright orange and yellow mushroom cloud rising from the city, with a dark, smoky plume trailing behind it. The cloud is set against a dark, overcast sky. The number '5' is centered in the upper part of the cloud.

5

Fallout from Chernobyl Accident

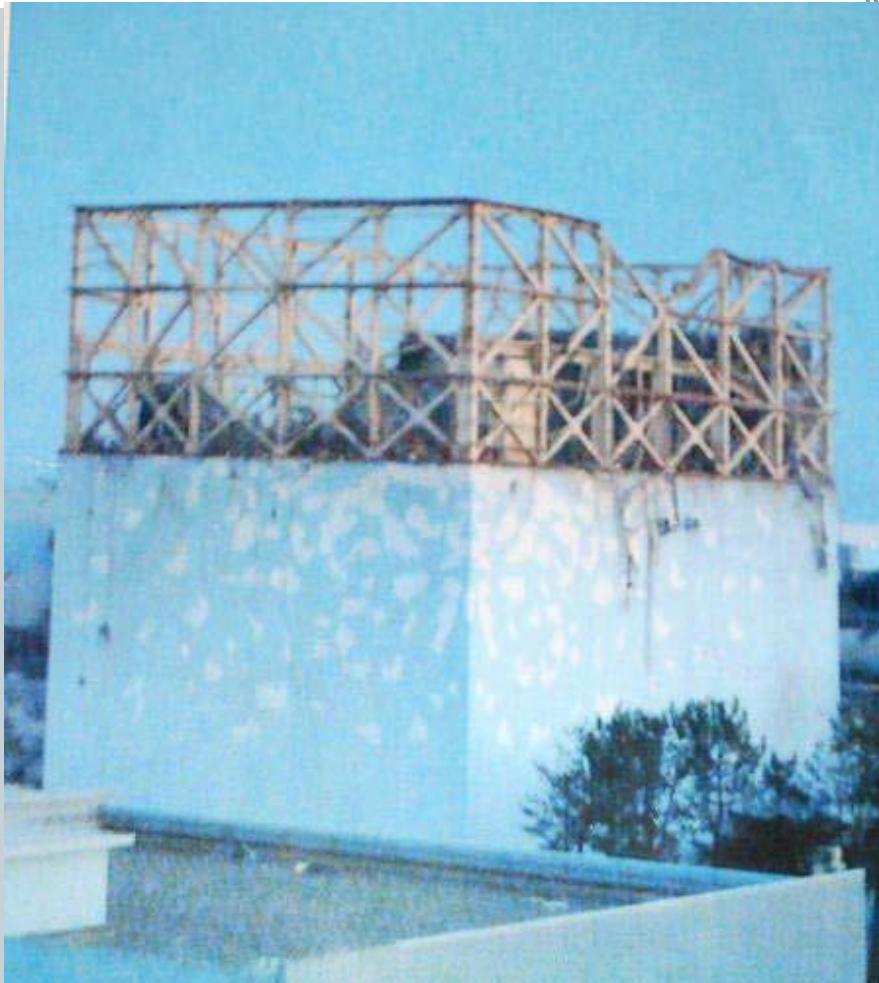
- atau Kecelakaan Reaktor Chernobyl



Ledakan Hidrogen

Kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi, Jepang

(11 Maret 2011)

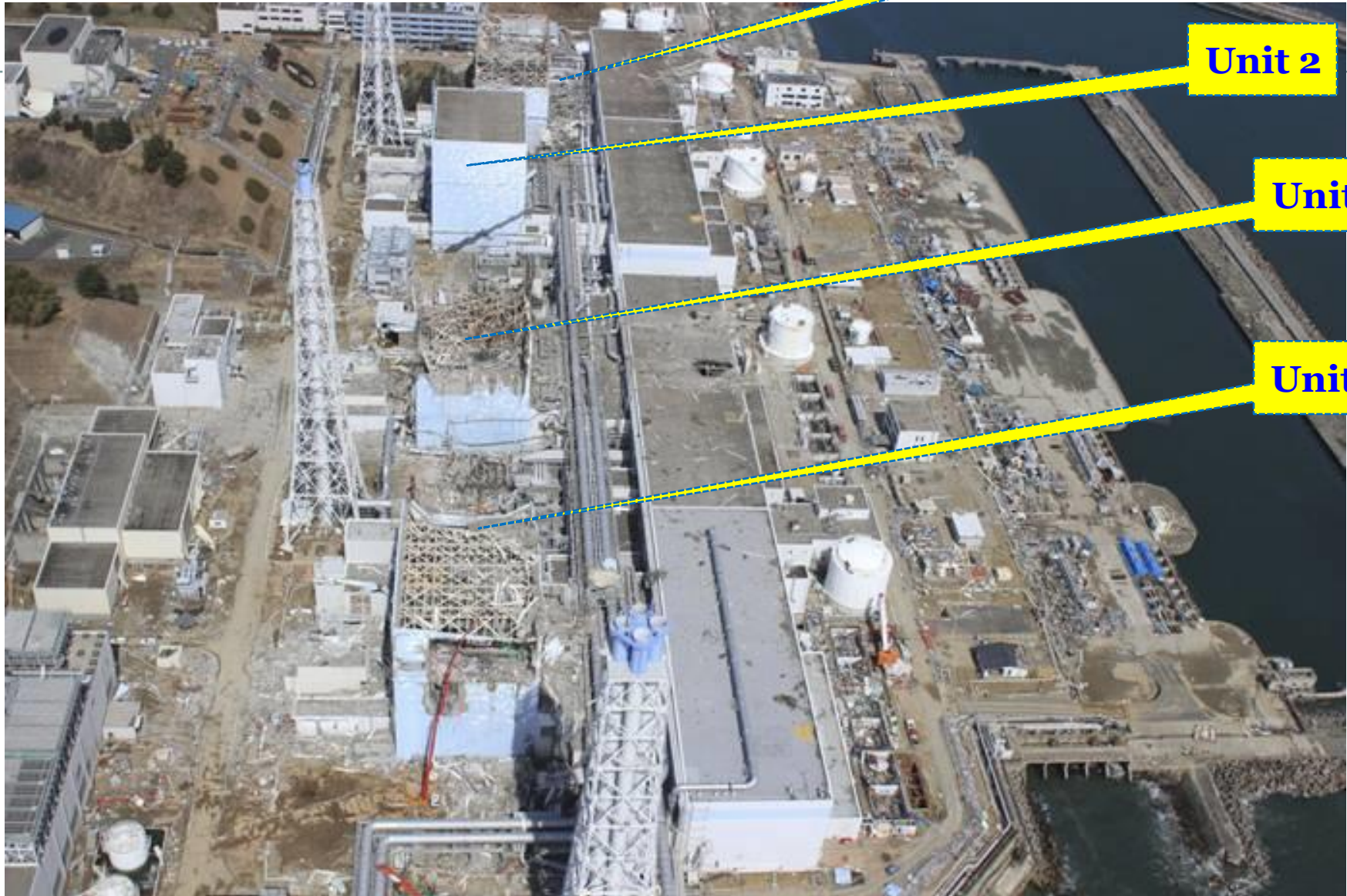


出典: 原子力安全保安院平成23年4月11日HP掲載資料

Orasi Ilmiah FGB – ITB, 14 Maret 2025

Fukushima-1 NPP

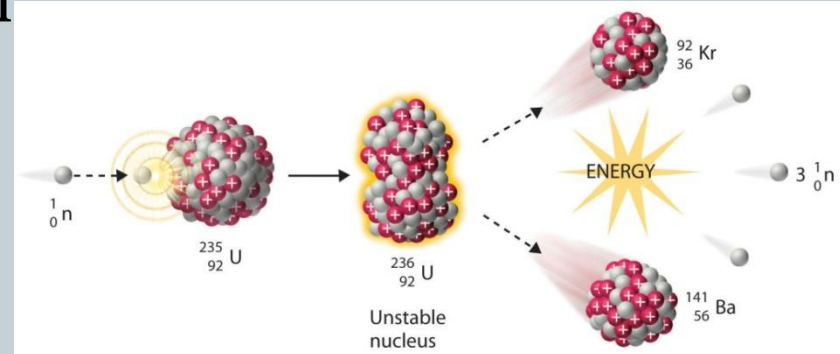
11/03/2011



Energi Nuklir

9

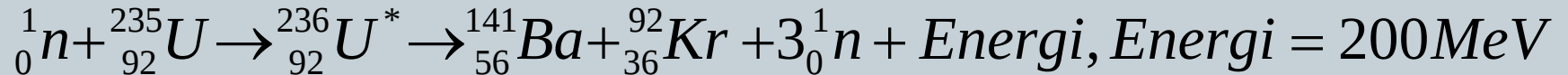
- Energi (fisi) nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir
- Ada dua jenis reaksi fisi: reaksi fisi spontan dan reaksi fisi yang diinduksi oleh partikel elementer tertentu (misalnya neutron).
- Dalam presentasi ini akan difokuskan pada reaksi fisi yang diinduksi oleh neutron (*neutron induced fission*), seperti pada gambar.
- Dua isotop baru yang dihasilkan disebut produk fisi (FP = *fission product*).



Energi Nuklir ...

10

- Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi sangat besar:



- Sebagai pembandingan, energi dari bahan bakar fosil:



- Energi nuklir 50.000.000 x lebih besar dari energi fosil

Energi Nuklir ...

11

- Dalam aplikasi perbandingannya menjadi berikut:

Sumber energi	Energi per kg bahan bakar	Jumlah Bahan Bakar per 1000 MWe per tahun
BB Nuklir	^{a)} 50.000 kWh	30 ton
Batubara	3 kWh	2.600.000 ton
Minyak bumi	4 kWh	2.000.000 ton

^{a)} Tanpa daur ulang

Energi Nuklir ...

12

- Sebagai sumber energi yang bebas emisi, energi nuklir dapat digunakan hingga **1.000.000 tahun → dengan memanfaatkan uranium dan thorium**
- Cadangan uranium dalam air laut adalah **1.000 kali** uranium di kerak Bumi
- Sedangkan cadangan thorium adalah **3-4 kali** cadangan uranium dalam kerak Bumi.

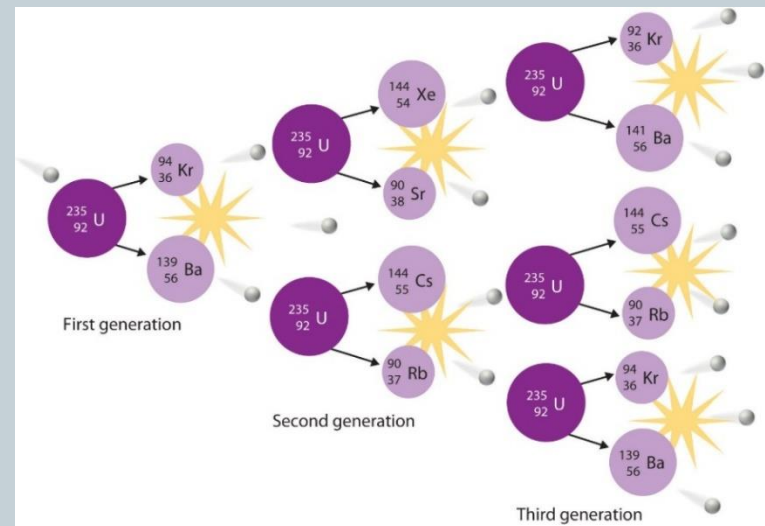
2. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN)

13

2.1. Reaktor Nuklir

14

- Agar energi nuklir dapat dimanfaatkan dengan baik, maka reaksi fisi harus kontinyu (**reaksi fisi berantai**).
- **Reaktor nuklir** adalah suatu peralatan dimana **reaksi fisi berantai terkendali**.
- Lawan dari reaktor nuklir adalah **bom atom (bom nuklir)** yaitu suatu devais dimana **reaksi fisi berantai tidak terkendali**.
- Reaktor nuklir dapat memproduksi >1300 isotop



Jenis Reaktor Nuklir

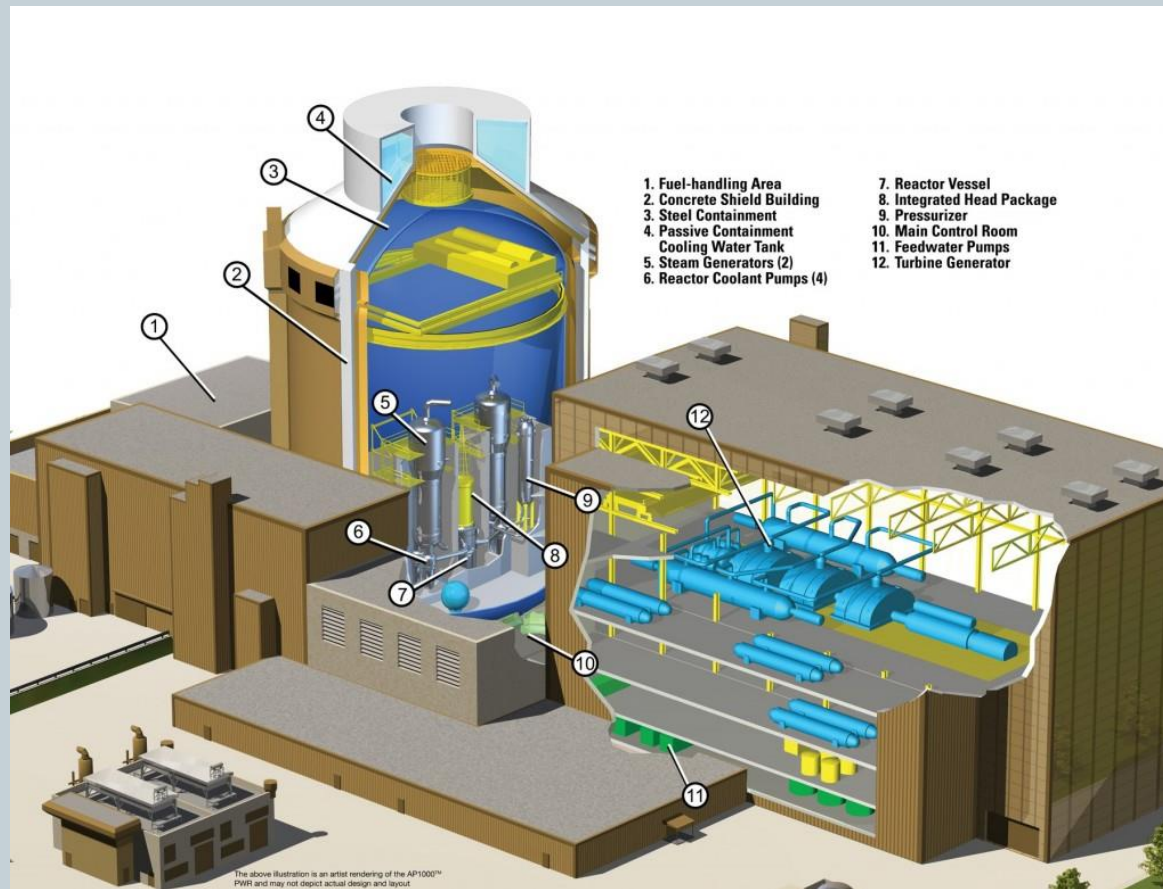
15

- Pengelompokan reaktor nuklir:
 - reaktor riset (*research reactor/ zero power reactor*)
 - reaktor pembiak (*breeder reactor*)
 - reaktor daya (*power reactor*)
- Reaktor daya:
 - reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor (PWR)*),
 - reaktor air mendidih (*boiling water reactor (BWR)*),
 - reaktor air berat bertekanan (*PHWR*)
 - reaktor gas suhu tinggi (*HTGR*)
 - LMFBR (*liquid metal fast breeder reactor*),
- Reaktor daya nuklir adalah sumber energi bagi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN)

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

16

Ilustrasi sebuah PLTN dengan Reaktor Daya Jenis PWR

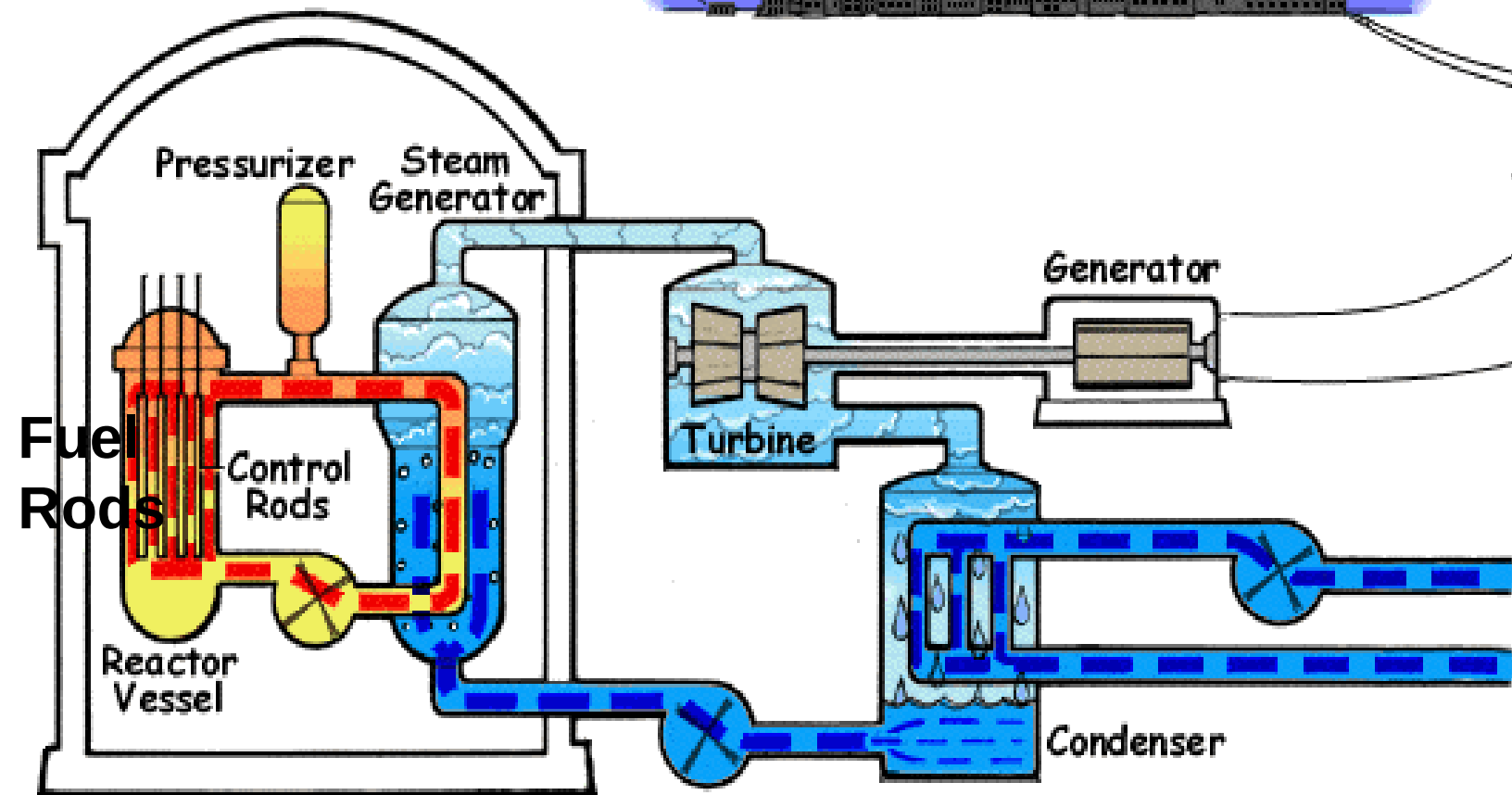
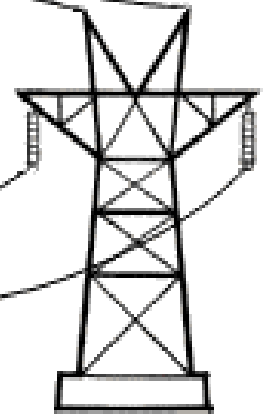


<http://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/>

Diagram Skematik PLTN

17

Containment Structure



2.2. Bahan Bakar Nuklir (BBN)

18

- Bahan bakar reaktor nuklir saat ini adalah uranium.
- Uranium secara alamiah memiliki 3 isotop (^{234}U , ^{235}U , ^{238}U):
- Hanya ^{235}U yang dapat mengalami reaksi fisi yang diinduksi oleh neutron termal.
- Isotop seperti ^{235}U disebut **material fisil** (*fissile material*).

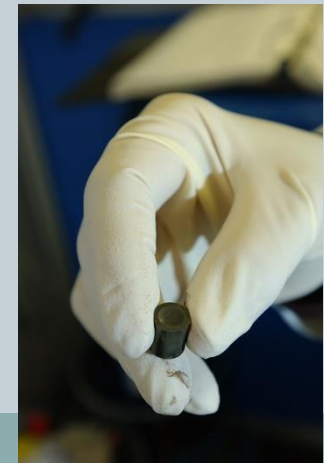
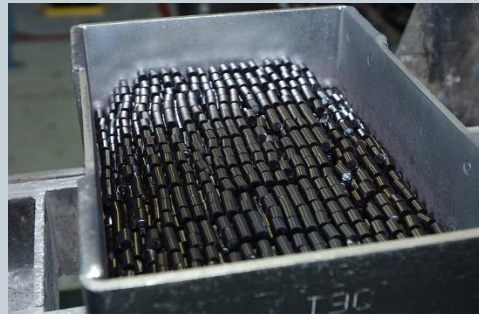
Isotop	Kelimpahan (%)	Massa (u)	Umur paroh (tahun)
U-234	0,0055	234,0410	$2,48 \times 10^5$
U-235	0,7200	235,0439	$7,13 \times 10^8$
U-238	99,2745	238,0508	$4,47 \times 10^9$

Penyiapan Bahan bakar nuklir

19

Tahapan penyiapan bahan bakar nuklir (UO_2) adalah sebagai berikut:

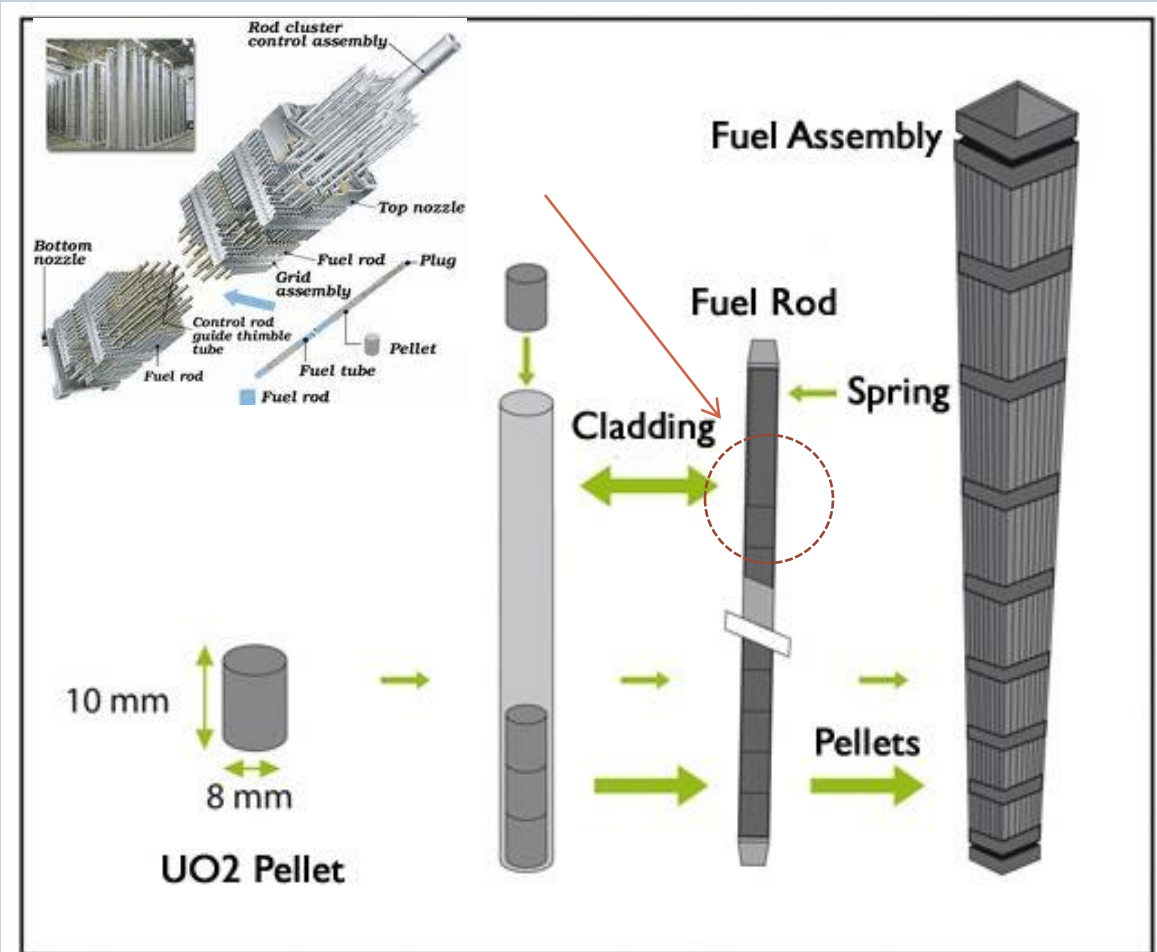
1. Penambangan untuk menghasilkan “*yellow cake*”, U_3O_8
2. Konversi pertama dari U_3O_8 (padat) ke UF_6 (gas) untuk pengayaan
3. Pengayaan : peningkatkan konsentrasi ^{235}U (0.71% dalam uranium alam menjadi 3-5 %)
4. Konversi kedua dari UF_6 (gas) menjadi UO_2 (padat). Kemudian dicetak menjadi *fuel pellet*
5. Fabrikasi batang bahan bakar (*fuel rod*) dan **asembli bahan bakar** (*fuel assembly*).



Contoh Susunan dan Asembli BBN

20

- **Reaksi fisi** terjadi di dalam batang bahan bakar (*fuel rod*)
- Hasil reaksi fisi juga tersimpan dalam *fuel rod*
- Sehingga **sisanya bahan bakar nuklir** (limbah nuklir) tetap terjaga dengan aman dalam *fuel rod*



2.3. Masalah dengan PLTN

21

Ada 3 isu penting terkait pemanfaatan energi nuklir:

- **Keselamatan** → PLTN mempunyai sistem keselamatan berlapis dengan kualifikasi keselamatan yang sangat tinggi
- **Non-proliferasi (Tidak menyebarkan bahan nuklir)** → lebih merupakan masalah politik
- **Limbah Nuklir** → Masalah utama terkait pemanfaatan PLTN adalah Bagaimana Mengelola Limbah Nuklir

Limbah Nuklir

22

Limbah nuklir dikelompokkan menjadi 3 jenis:

- *LLW (low level waste)*: dihasilkan dari semua kegiatan yang melibatkan bahan radioaktif (nuklir). Contohnya: pakaian operator PLTN, dan sumber radiasi yang sudah lama (tingkat radiasi sudah rendah)
- *MLW (medium level waste)*: bahan radioaktif dari sisa bahan bakar nuklir dengan umur-paroh ~ 30 tahun (contoh: ^{137}Cs dan ^{90}Sr)
- *HLW (high level waste)*: bahan radioaktif dari sisa bahan bakar dengan umur-paroh > 100 tahun

High Level Waste (HLW)

23

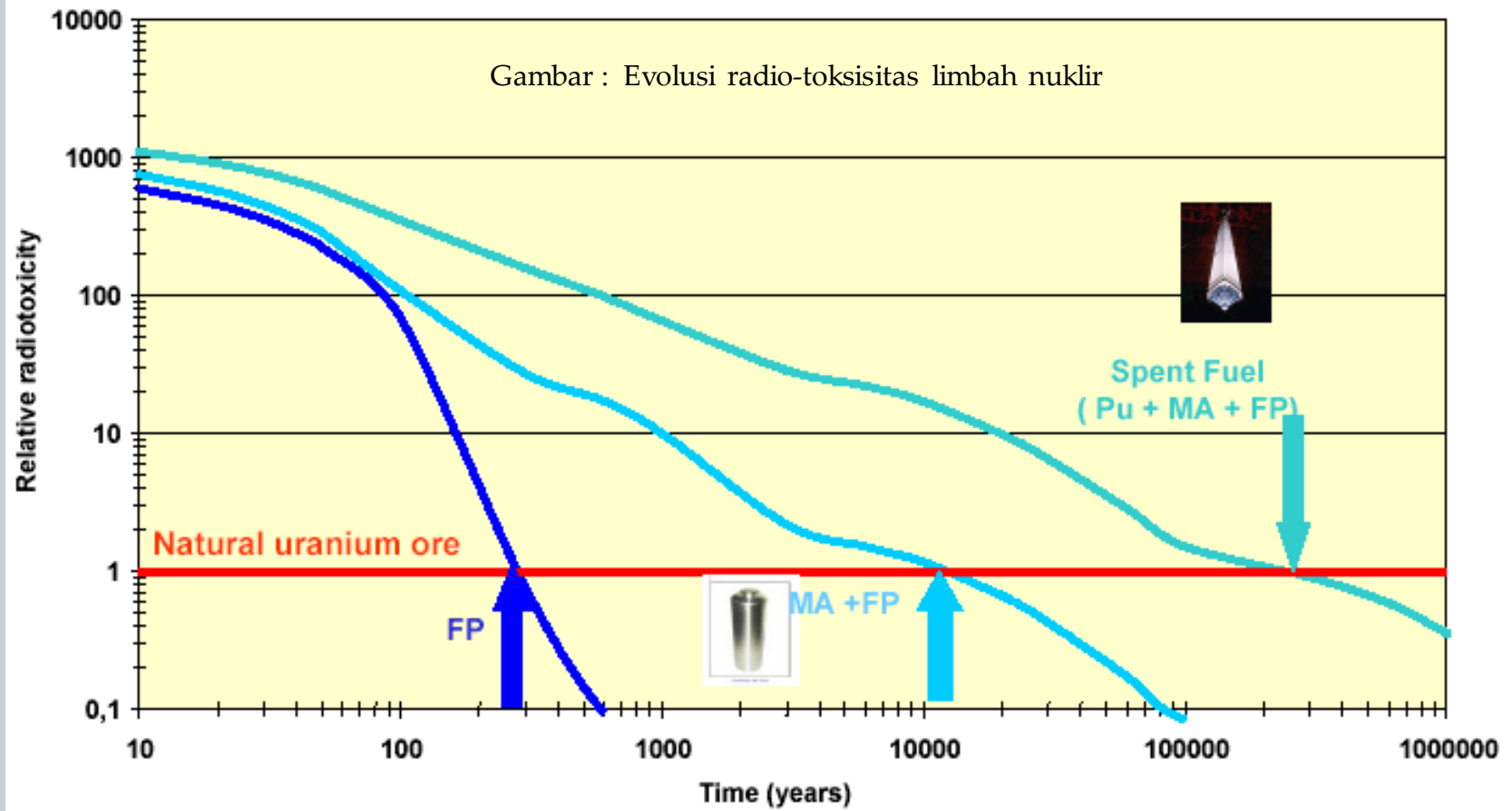
- HLW terdiri dari *Trans-Uranium* (TRU) dan *long-lived fission products* (LLFP).
- TRU terdiri dari Plutonium (Pu) dan Aktinida Minor (MA).
- MA terdiri dari Neptunium (Np), Americium (Am), dan Curium (Cm)

LLFP		Pu		MA	
Isotop	Umur paroh (tahun)	Isotop	Umur paroh (tahun)	Isotop	Umur paroh (tahun)
Se-79	$3,27 \times 10^5$	Pu-238	$8,77 \times 10^1$	Np-237	$2,14 \times 10^6$
Zr-93	$1,53 \times 10^6$	Pu-239	$2,41 \times 10^4$	Am-241	$4,33 \times 10^2$
Tc-99	$2,11 \times 10^5$	Pu-240	$6,56 \times 10^3$	Am-242m	$1,41 \times 10^2$
Pd-107	$6,5 \times 10^6$	Pu-241	$1,43 \times 10^1$	Am-243	$7,37 \times 10^3$
Sn -126	$2,30 \times 10^5$	Pu-242	$3,73 \times 10^5$	Cm-243	$2,91 \times 10^1$
I-129	$1,57 \times 10^7$			Cm-244	$1,81 \times 10^1$
Cs-135	$2,3 \times 10^5$			Cm-245	$8,50 \times 10^3$

Radiotoksistas HLW

24

- Ada apa dengan limbah nuklir (HLW) ???



Sumber: C. Ganguly,, ICTP Workshop, 20-24 November 2006, Trieste, Italy

3. PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR

25

3.1. Metode Pengelolaan Limbah Nuklir

26

Ada 2 opsi untuk mengelola limbah nuklir:

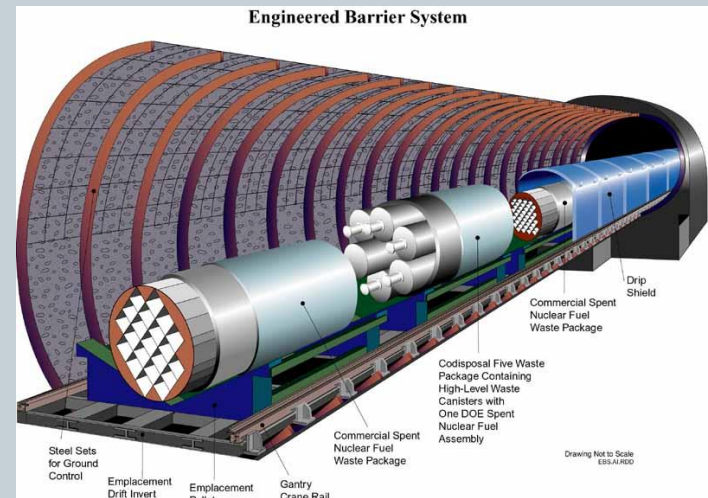
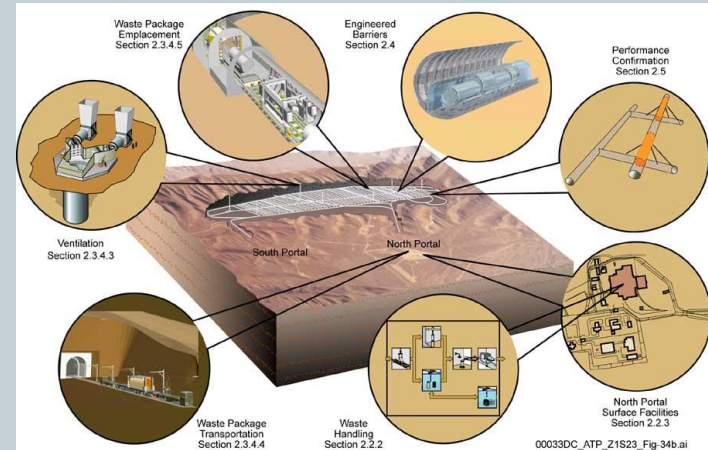
- Opsi pertama adalah *open cycle* (OC) atau *once through cycle* (OTC)
- OTC dapat dilakukan dengan beberapa metode
 1. Dibuang ke angkasa luar (*outer space disposal*)
 2. Dibuang ke bawah gunung es (*ice-sheet disposal*)
 3. Dibuang ke dasar laut (*sub-seabed disposal*)
 4. Dibuang ke pembuangan bawah tanah (*deep geological disposal*)

Pembuangan limbah nuklir bawah tanah

27

- Dari 4 metode OTC, hanya metode pembuangan bawah tanah yang paling aman dan terjamin untuk dilakukan.
- Secara ideal tempat pembuangan bawah tanah harus dapat bertahan sampai 10^5 - 10^6 tahun.
- Namun sayangnya sejauh ini kita (*civil engineer*) hanya bisa menjamin ketahanan konstruksi bangunan sampai 10^6 tahun.
- **Vitrifikasi** pada saat pengepakan sebelum dibuang dapat memperpanjang daya tahan sistem pengepakan HLW hingga **10000 tahun**.
- Proses vitrifikasi merupakan *lesson learned* dari **Kerajaan Babilonia dan Mesir Kuno**.

28



3.2. Reprocessing & Recycling

29

- Opsi kedua adalah *closed cycle* atau *recycling* (daur ulang) atau *partitioning & transmutation* (pemisahan dan transmutasi).
- Untuk opsi ini, sisa BBN diproses terlebih dahulu (*reprocessing*)
- *Reprocessing* meliputi: pendinginan, *decladding*, dan partisi.
- *Decladding* diperlukan agar sisa pellet bahan bakar dapat dikeluarkan dari kelongsong.
- Partisi adalah proses pemisahan kandungan sisa BBN secara kimia (separasi elemental) menjadi U, Pu, MA, FP, dll.

Daur Ulang Pu & MA

30

- Dari sudut pandang **non-proliferasi** nuklir, **daur ulang Pu tanpa MA** sangat beresiko.
- Jika Pu tersebut dicuri setelah dipisahkan di instalasi pengolahan sisa BBN akan dengan **mudah dikonversi menjadi senjata nuklir**.
- Pu & MA sebaiknya didaur ulang secara bersamaan.
- Jika hal ini dapat dilakukan maka mimpi ***zero release nuclear waste*** dapat direalisasikan.

3.3. Menuju Zero Release Nuclear Waste

31

- Konsep *zero release nuclear waste* sangat menarik jika dapat direalisasikan → *public acceptance* terkait energi nuklir akan meningkat.
- Pada bagian ini akan dijelaskan hal-hal yang sudah diteliti terkait dengan pengelolaan bahan bakar dan limbah nuklir guna merealisasi konsep *zero release nuclear waste*
- Untuk merealisasi konsep ini maka seluruh sisa BBN atau minimum Pu dan MA harus didaur ulang dalam reaktor nuklir.

3.3.1. *Nuclear Equilibrium State*

32

- *Nuclear Equilibrium State* (keadaan kesetimbangan nuklir) adalah keadaan hipotetik yang menyatakan bahwa masing-masing isotop (nuklida) yang dihasilkan dalam reaktor nuklir pada akhirnya akan berjumlah tetap selama operasi reaktor.
- *Faktanya berdasarkan referensi (M Salvatores, I. Slessarev, A. Tchistiakov, [Analysis of Nuclear Power Transmutation Potential at Equilibrium](#), Nuclear Science and Engineering, 124,2, pp. 280-290, 1996)* keadaan ini dapat dicapai setelah 60-90 tahun → sesuai dengan umur operasi PLTN

3.3.1. Nuclear Equilibrium State

33

- Perubahan komposisi teras reaktor karena perubahan densitas berbagai isotop melalui sejumlah reaksi nuklir dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \phi\sigma_{a,i} + R_i)N_i + \sum_j \lambda_{j \rightarrow i} N_j + \phi \sum_j \sigma_{j \rightarrow i} N_j + S_i, i = 1368 \text{ nuklida}$$

- Jika diasumsikan terjadi keadaan kesetimbangan nuklir (*nuclear equilibrium state*), maka pers. di atas menjadi:

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \phi\sigma_{a,i} + R_i)N_i + \sum_j \lambda_{j \rightarrow i} N_j + \phi \sum_j \sigma_{j \rightarrow i} N_j + S_i = 0$$

- Sehingga dapat disederhanakan menjadi pers. matriks:

$$\mathbf{Mn} = \mathbf{s}$$

Nuclear Equilibrium State ...

34

- Untuk menguji kekritisan reaktor, digunakan faktor multiplikasi yang bisa didekati dari pers. berikut

$$h = \frac{(\mathbf{f}, \mathbf{s})}{(\mathbf{a}, \mathbf{s})}$$

- Dimana vektor $\mathbf{f}$ dan $\mathbf{a}$ dihitung dari pers. adjoint matriks berikut:

$$\mathbf{M}^t \mathbf{f} = \phi \mathbf{v} \sigma_f,$$

- Kebutuhan pengayaan uranium ditentukan dari pers. berikut:

$$(f_{24} - \alpha k_c a_{24})s_{24} + (f_{25} - \alpha k_c a_{25})s_{25} + (f_{28} - \alpha k_c a_{28})s_{28} = 0$$

$$s_{24} + s_{25} + s_{28} = 100$$

$$100s_{24} - 0.9937s_{25} = -0.1925$$

- Dengan kumpulan persamaan sederhana ini, dapat disimulasikan kondisi teras suatu reaktor nuklir dengan beberapa skenario daur ulang. Termasuk kondisi ekstrim

Nuclear Equilibrium State ...

35

- Hasil yang diperoleh untuk beberapa skenario daur ulang:
 - 1: Tanpa daur ulang.
 - 2: Pu didaur-ulang sebagian
 - 3: Pu didaur-ulang semua
 - 4: Semua HM kecuali U didaur-ulang.
 - 5: Semua HM didaur-ulang (skenario ekstrim)

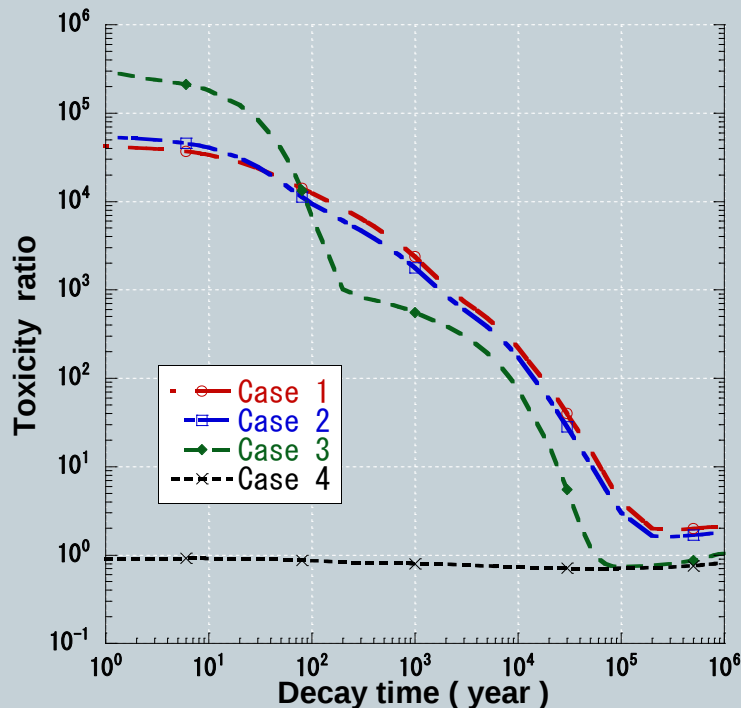
Hasil ini mendekati keadaan riil reaktor

Skenario	Pengayaan (w/o)	Suplai BBN (t/y)*1	Flux (cm ⁻² . s ⁻¹)	Burnup (GWd/t) *2	Kebutuhan U alam(t/y)	
					0.1 w/o tail	0.3 w/o tail
1	4.2	29.0	3.83 x 10 ¹⁴	37.9	195.4	276.3
2	4.0	28.8	3.80 x 10 ¹⁴	38.1	185.3	261.4
3	3.8	28.1	3.73 x 10 ¹⁴	39.0	169.2	237.9
4	3.6	27.6	3.71 x 10 ¹⁴	39.8	158.9	222.8
5	41.6	1.2	3.46 x 10 ¹⁴	952.7	79.4	117.5

Nuclear Equilibrium State ...

36

- Grafik berikut menggambarkan rasio evolusi radio-toksistas (skenario 1 -4)
- Skenario 5 tanpa radio-toksistas dalam limbah



- *Nuclear equilibrium State* merupakan topik Disertasi di Dept. of Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology, 1999-2002

3.3.2. Daur ulang limbah nuklir pada beberapa jenis reaktor nuklir

37

- Selanjutnya ditampilkan sebagian hasil penelitian tentang daur ulang limbah nuklir pada kondisi standar reaktor PWR buatan Westinghouse dengan spesifikasi berikut:

Thermal output (MWth)	3400
Fuel weight (kg)	94676,9
Burnup (GWD/MTU)	40,0
Number of assemblies	193
Fuel element array in assembly	17 x 17
Assembly dimension	21,4 x 21,4
Fuel pellet diameter (cm)	0,819
Average linear power density (W/cm)	178

- Komposisi Pu & MA yang didaur-ulang adalah sebagai berikut

Plutonium		Minor Actinides	
Pu-238	1.81%	Np-237	16.67%
Pu-239	59.14%	Am-241	52.05%
Pu-240	22.96%	Am-242m	1.51%
Pu-241	12.13%	Am-243	29.23%
Pu-242	3.96%	Cm-245	0.54%

38

- | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| | | | | 49 | 48 | 47 | 46 | 45 | 44 | 43 | | | | | |
| | | 52 | 51 | 50 | 64 | 76 | 75 | 74 | 63 | 42 | 41 | 40 | | | |
| | 54 | 53 | 112 | 111 | 110 | 109 | 108 | 107 | 106 | 105 | 104 | 39 | 38 | | |
| | | 55 | 77 | 113 | 128 | 144 | 143 | 142 | 141 | 140 | 127 | 126 | 103 | 37 | |
| 1 | 56 | 78 | 114 | 145 | 168 | 167 | 166 | 165 | 164 | 163 | 125 | 102 | 36 | 35 | |
| 2 | 57 | 79 | 115 | 146 | 169 | 184 | 183 | 182 | 181 | 162 | 124 | 101 | 62 | 34 | |
| 3 | 65 | 88 | 129 | 147 | 169 | 185 | 192 | 191 | 180 | 161 | 139 | 100 | 73 | 33 | |
| 4 | 66 | 81 | 130 | 148 | 171 | 186 | 193 | 190 | 179 | 160 | 138 | 99 | 72 | 32 | |
| 5 | 67 | 82 | 131 | 149 | 172 | 187 | 188 | 189 | 178 | 159 | 137 | 98 | 71 | 31 | |
| 6 | 58 | 83 | 116 | 150 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 158 | 123 | 97 | 61 | 30 | |
| 7 | 8 | 84 | 117 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 122 | 96 | 28 | 29 | |
| | | 9 | 85 | 118 | 119 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 120 | 121 | 95 | 27 | |
| | | | 10 | 11 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 25 | 26 |
| | | | | 12 | 13 | 14 | 59 | 68 | 69 | 70 | 60 | 22 | 23 | 24 | |
| | | | | | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | | | | |

 Region 1
  Region 2
  Region 3

- | Skenario | Tanpa daur ulang (kg) | Dengan daur ulang Plutonium & MA (kg) |
|----------|-----------------------|---------------------------------------|
| I | 94676,9 | 83613,79 |
| II | | 81818,19 |
| III | | 79992,65 |

3.3.4. Skenario SUPEL

39

- Untuk melakukan daur ulang sisa BBN dibutuhkan tahapan *reprocessing*.
- Masalahnya adalah tidak semua negara diizinkan memiliki fasilitas *reprocessing*.
- Negara yang sangat maju dalam industri nuklir sekalipun, seperti Korea Selatan, tidak diizinkan memiliki instalasi *reprocessing*.
- Untuk mengelola limbah nuklir tanpa tahap *reprocessing*, Korea Selatan mengembangkan konsep DUPIC (*Direct Utilization of spent PWR fuel In CANDU*)
- Akan tetapi untuk merealisasikan konsep DUPIC diperlukan 2 tipe reaktor, yaitu PWR dan CANadian Deuterium Uranium reactor (CANDU).
- Ide ini akan menjadi mahal untuk negara-negara tertentu, seperti Indonesia.

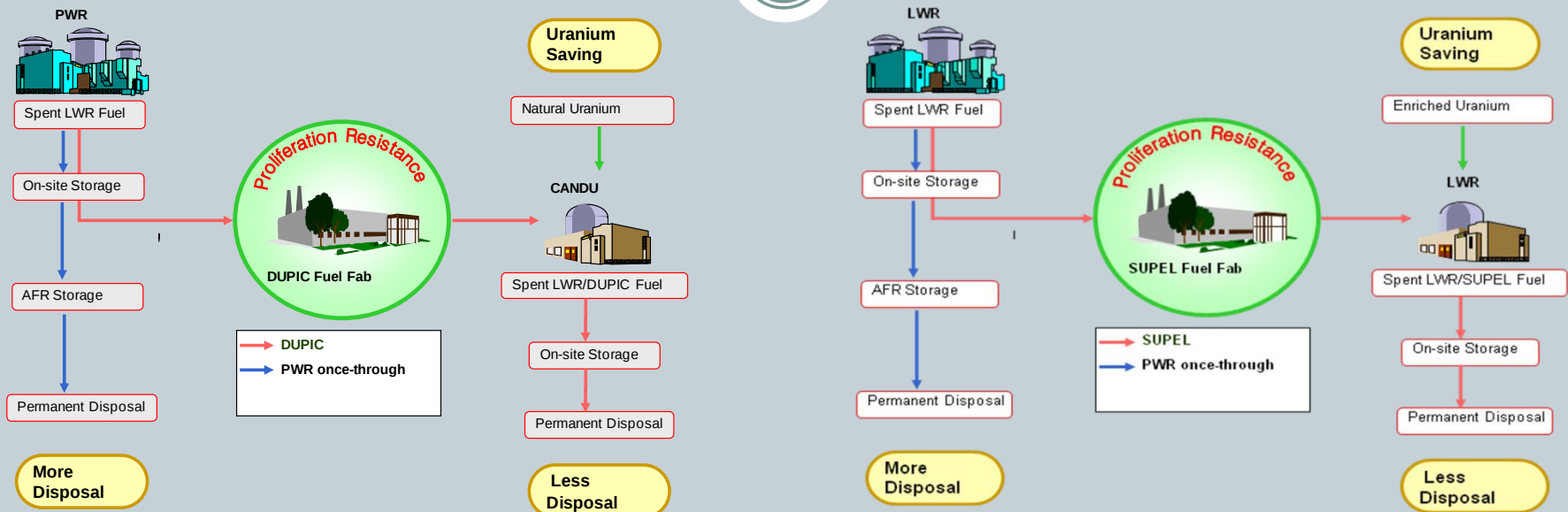
Skenario SUPEL ...

40

- Mengingat negara kita memiliki keterbatasan dalam anggaran, tidak diizinkan memiliki fasilitas *reprocessing* limbah nuklir dan kalau ingin "*go nuclear*" kemungkinan besar hanya akan **memilih satu jenis reaktor nuklir LWR** (apakah PWR atau BWR) untuk PLTN yang akan dibangun, maka **Indonesia seyogyanya memiliki strategi lain untuk penanganan sisa BBN**
- Kami telah mengusulkan suatu skenario pemanfaatan energi nuklir bagi negara seperti Indonesia dengan nama **skenario *SUPEL* (*S*traight *U*tilization of *sP*Ent *LWR* fuel in *LWR* reactor)**

DUPIC vs SUPEL

41



Konsep DUPIC untuk daur ulang sisa BBN

Skenario SUPEL untuk daur ulang sisa BBN

- Penelitian terkait skenario SUPEL dibiayai oleh Riset ITB dan Asahi Glass
- Beberapa hasilnya dipublikasikan dalam referensi berikut:
 1. A. Waris, et.al., *Preliminary study on direct recycling of spent BWR fuel in BWR system*, AIP Conf. Proc. 1454, pp.73-76, 2012
 2. A. Waris, et.al., *SUPEL Scenario for PWR Spent Fuel Direct Recycling Scheme*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 575, pp. 653-657, 2014
 3. A. Waris, et.al., [*Influence of void fraction on BWR spent fuel direct recycling scenario*](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, pp. 15172-15178, 2015

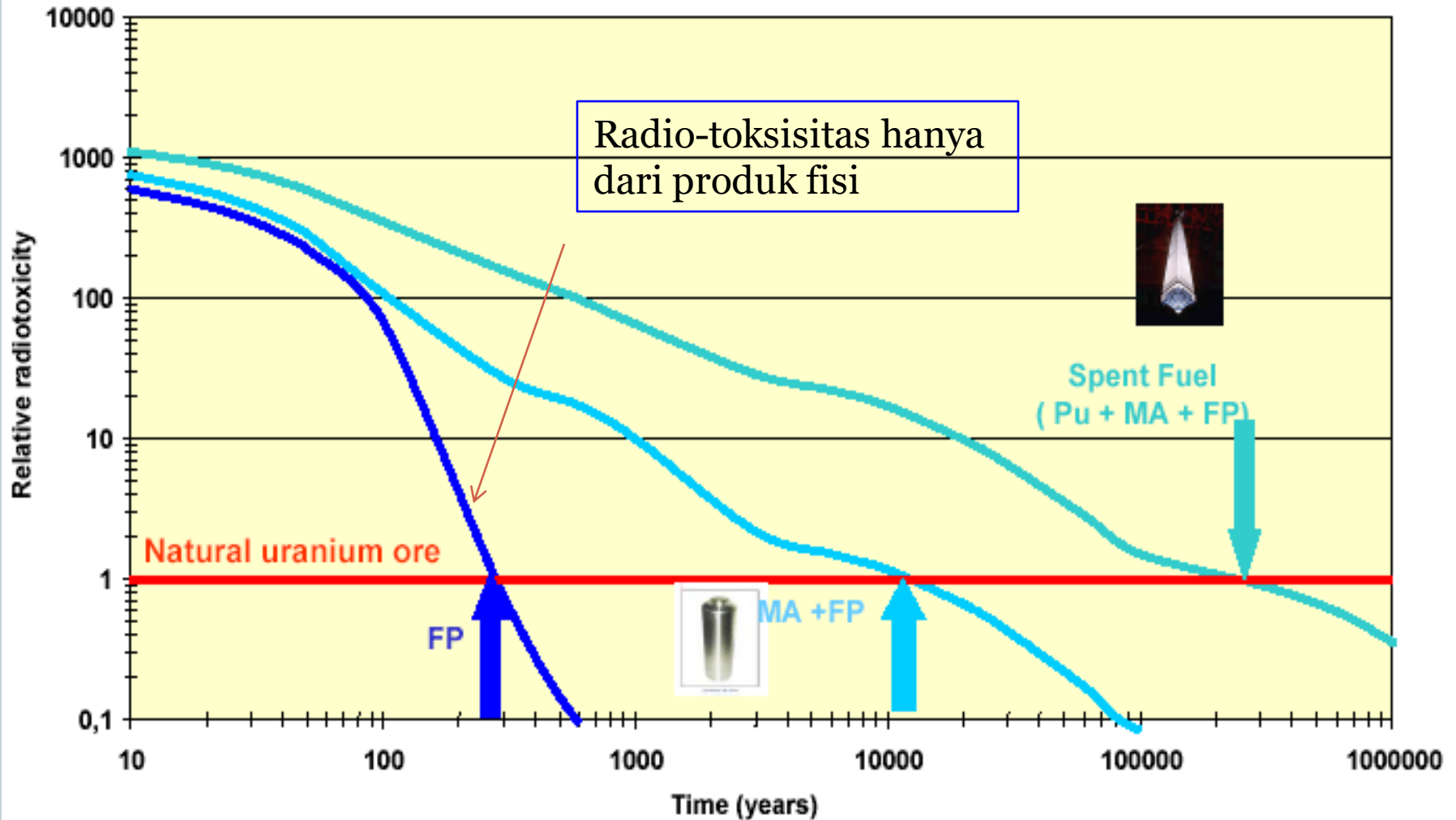
3.3.5. Thorium dan MSR

42

	Uranium Fuel Cycle	Thorium Fuel Cycle
Bahan nuklir utama	U-234, U-235, U-238	Th-232, U-233
Kelebihan	- Digunakan pada PLTN sekarang - Proven technology	- Thorium 3-4 x lebih banyak di kerak bumi dibanding Uranium - Menghasilkan sedikit Plutonium (Pu) dan Minor Actinides (MA)
Kekurangan	Membutuhkan pengayaan Uranium	Perlu U-233/U-235/Pu untuk <i>start up of reactor</i>
	Menghasilkan banyak Plutonium (Pu) dan Minor Actinides (MA)	

Radio-toksistas BBN Thorium

43



Daur ulang limbah nuklir dalam Reaktor Thorium

44

Beberapa hasil penelitian tentang daur ulang sisa BBN (dari *Uranium fuel cycle*) ke dalam reaktor nuklir dengan BBN Thorium adalah:

- A. Waris, et.al., *Comparative Studies on Thorium Fuel Cycles of BWR with JENDL 3.2 and JEF 2.2 Data Libraries*, International Journal on Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 8, No. 1, pp.1-11, 2014
- A. Waris, et.al., *Effect of void-fraction on characteristics of several thorium fuel cycles in BWR*, Energy Conversion Management, 63, pp.11-16, 2012
- A. Waris, et.al., *Study on Equilibrium Characteristics of Thorium-Plutonium-Minor Actinides Mixed Oxides Fuel in PWR*, AIP Conference Proceeding Vol 1244, pp. 85-90, 2010

Reaktor Nuklir Generasi IV

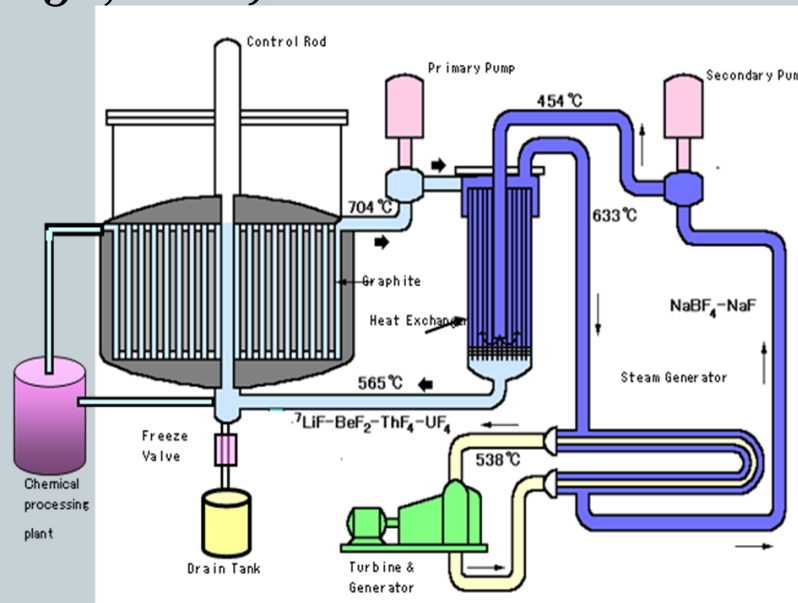
45

- Pada 2001 sebuah organisasi internasional didirikan dengan nama **Generation IV International Forum (GIF)** untuk pengembangan sistem energi nuklir generasi baru, yang disebut **Generasi IV (Gen-IV)**
- Reaktor Gen-IV diharapkan mulai beroperasi tahun 2030.
- **GIF memilih 6 sistem reaktor nuklir baru untuk Generasi IV:**
 1. GFR (*Gas-Cooled Fast Reactor System*),
 2. LFR (*Lead-Cooled Fast Reactor System*),
 3. **MSR (*Molten Salt Reactor System*)**,
 4. SFR (*Sodium-Cooled Fast Reactor System*),
 5. SWCR (*Supercritical-Water-Cooled Reactor System*),
 6. VHTR (*Very-High-Temperature Reactor System*).

Molten Salt Reactor (MSR)

46

- Dari 6 sistem reaktor Gen-IV hanya MSR yang secara inheren menggunakan thorium sebagai bahan bakar utama.
- MSR merupakan satu-satunya reaktor dengan bahan bakar cair.
- Diagram skematik dari MSR (D. LeBlanc, *Molten Salt Reactor: A New Beginning for an Old Idea*, Nuclear Engineering & Design, Vol. 240, pp. 1644-1656, 2010).



Molten Salt Reactor ...

47

MSR memiliki beberapa kelebihan :

- *Tingkat keselamatan yang lebih tinggi* ← Tekanan operasi rendah (~ 4 atm),
- *Proliferation resistance* ← lebih sedikit limbah nuklir
- *Bahan bakar lebih terjamin* ← menggunakan thorium
- Dapat membakar limbah sendiri
- Dapat digunakan untuk produksi gas hidrogen karena beroperasi pada suhu tinggi (> 600 °C).

Masalah dengan MSR:

- Thorium bukan material fisil → untuk memulai operasi MSR diperlukan material fisil ^{233}U .
- ^{233}U sendiri tidak ada di alam, tetapi dapat dihasilkan dalam MSR.

Sebagai pengganti ^{233}U , beberapa desain MSR menggunakan Pu atau ^{235}U .

Daur ulang limbah nuklir dalam MSR

48

Beberapa hasil penelitian terkait daur ulang limbah nuklir dalam MSR adalah:

1. A Waris, Indarta K Aji, S Pramuditya, S Permana, Z Su'ud, *Comparative Studies on Plutonium and Minor Actinides Utilization in Small Molten Salt Reactors with Various Powers and Core Sizes*, Energy Procedia, 71, pp. 62-68, 2015
2. Abdul Waris, Very Richardina, Indarta Kuncoro Aji, Sidik Permana, and Zaki Su'ud, *Preliminary study on plutonium and minor actinides utilization in thorims-nes minifuji reactor*, Energy Conversion Management, 72, pp.27-32, 2013
3. Abdul Waris, Indarta Kuncoro Aji, Yanti Yulianti, Muhamad Ali Shafii, Imam Taufiq, Zaki Suud, *Comparative Study on ^{233}U and Plutonium Utilization in Molten Salt Reactor*, Indonesian Journal of Physics, Vo. 21, No. 3, pp. 77-81, 2010

Berkah dari Penelitian MSR

49

- Karena penelitian tentang MSR merupakan ide lama yang dimunculkan kembali, maka peluang untuk melakukan kolaborasi internasional terbuka lebar.
- Berkah dari penelitian tentang MSR ini adalah :
 1. Diundang menjadi anggota *ITMSF (Internasional Thorium Molten Salt Forum)*
 2. Menjadi anggota *Working Group on MSR Technology* di *IAEA (International Atomic Energy Agency)*.
 3. In syaa Allah, pada bulan April 2017, akan diterbitkan oleh Elsevier Inc., USA, sebuah buku yang ditulis bersama oleh sejumlah peneliti dari berbagai negara berjudul “*Molten Salt Reactors*”. Salah satu bab dari buku tersebut berisi aktivitas penelitian MSR di Indonesia yang kami rangkum

4.PENUTUP

50

- Telah dibahas beberapa metode yang terkait dengan pengelolaan bahan bakar & limbah nuklir.
- Namun demikian untuk menuju *zero release nuclear waste*, masih banyak R & D yang perlu dilakukan seperti menyediakan perpustakaan data nuklir yang membutuhkan *nuclear physicists*.
- Disamping itu, penggunaan thorium dalam reaktor Gen-IV sangat menjanjikan untuk mengurangi jumlah limbah nuklir → R & D untuk mewujudkan hal ini juga perlu dilakukan secara lebih intensif.

TERIMA KASIH

51