

Jaderný palivový cyklus a jeho aplikace v ČR

doc. PhDr. Tomáš Vlček, Ph.D.

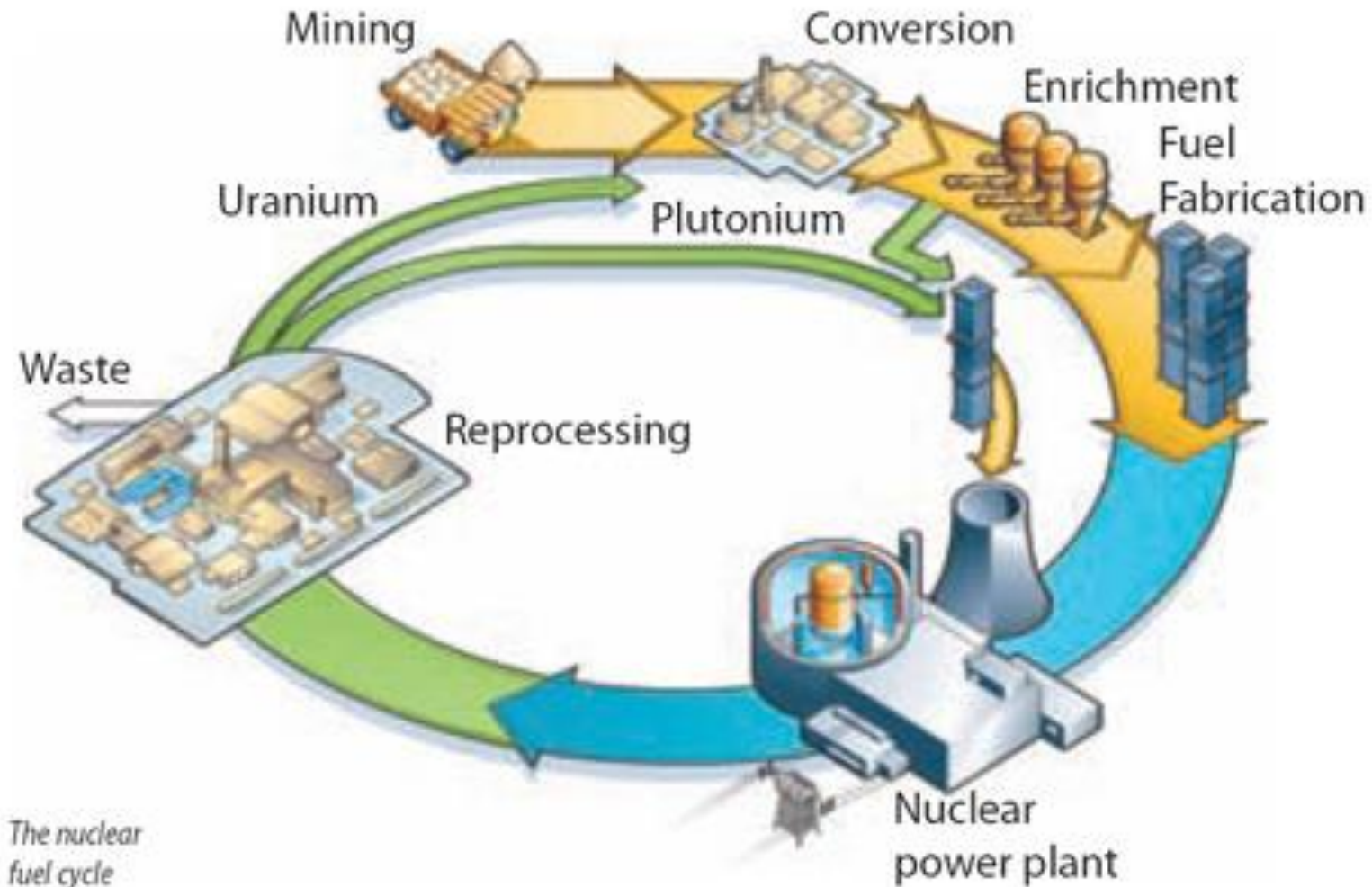
tomas.vlcek@mail.muni.cz

Obsah

- **Front End**
 - Těžba
 - Zpracování
 - Konverze
 - Obohacení
 - Fabrikace
- **Service Part**
 - Světová reaktorová flotila
 - Využití jaderné elektrárny
- **Back End**
 - Hlubinné úložiště
- **Bonus: co se děje s elektřinou?**

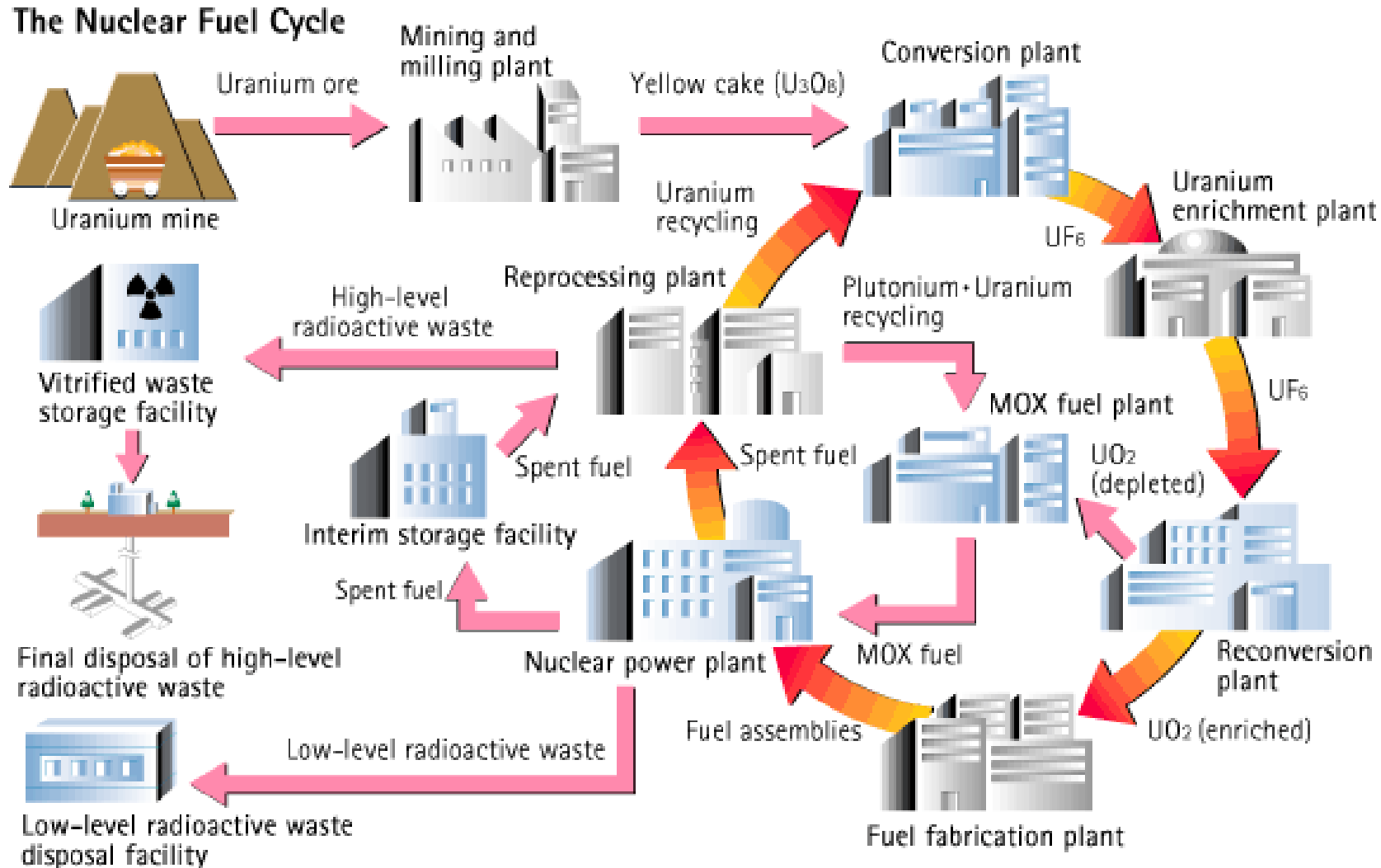


Jaderný palivový cyklus

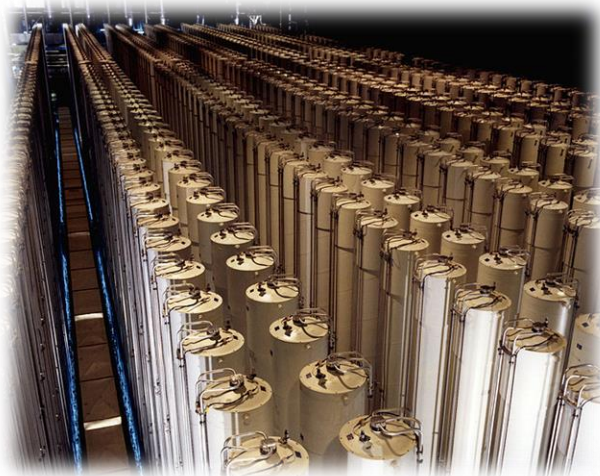
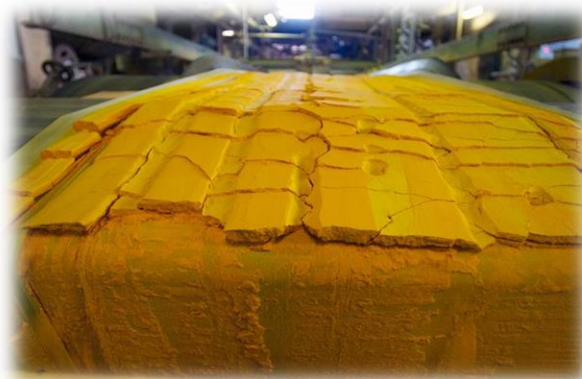


The nuclear fuel cycle

Jaderný palivový cyklus



Jaderný palivový cyklus



Uran

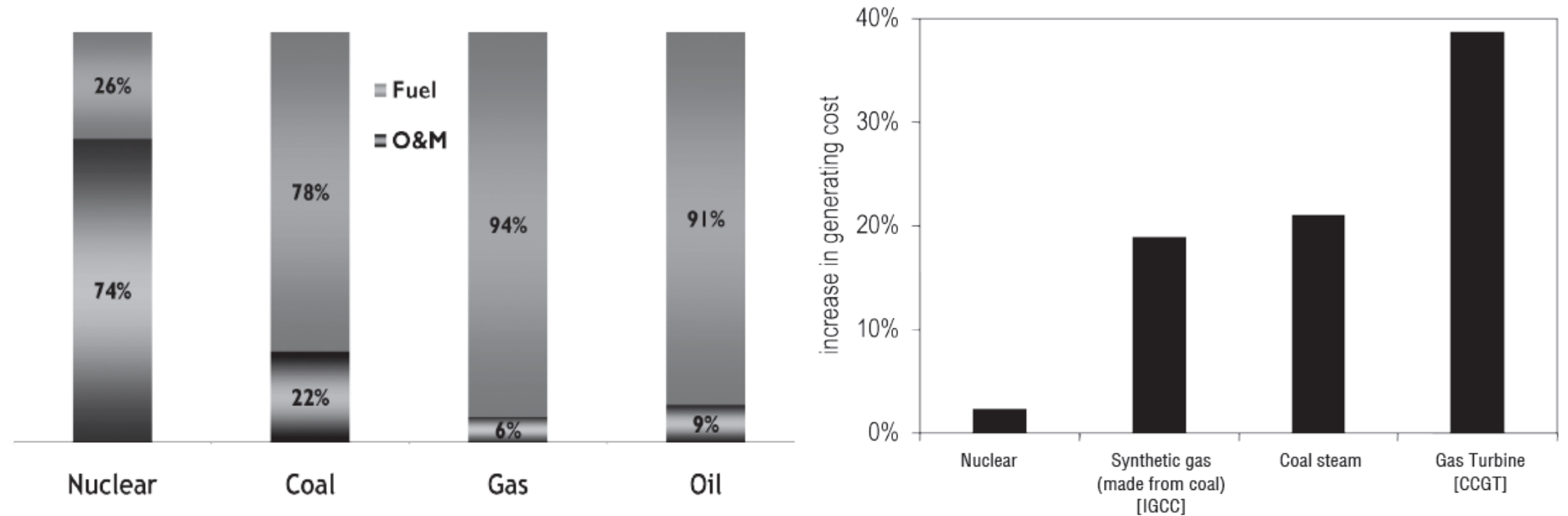
Náklady na 1 kg uranu jako UO₂ paliva v přední části palivového cyklu (v cenách roku 2017, zdroj: WNA)

Uran	8.9 kg U ₃ O ₈	\$ 68 per kg	\$ 605	43%
Konverze	7.5 kg U	\$ 14 per kg	\$ 105	8%
Obohacení	7.3 SWU	\$ 52 per SWU	\$ 380	27%
Fabrikace	1 kg	\$ 300 per kg	\$ 300	22%
Celkem			\$ 1390	100%

Celková hodnota segmentu Front Endu je cca **25 miliard USD** ročně.

Zdroj: Steve Kidd, World Nuclear Association

Uran



Nákupčí maximálně tlačí na cenu paliva, protože mají pocit, že jde o jediný provozní náklad, jehož výši mohou ovlivnit. Palivo má však minoritní roli v operačních nákladech elektrárny.

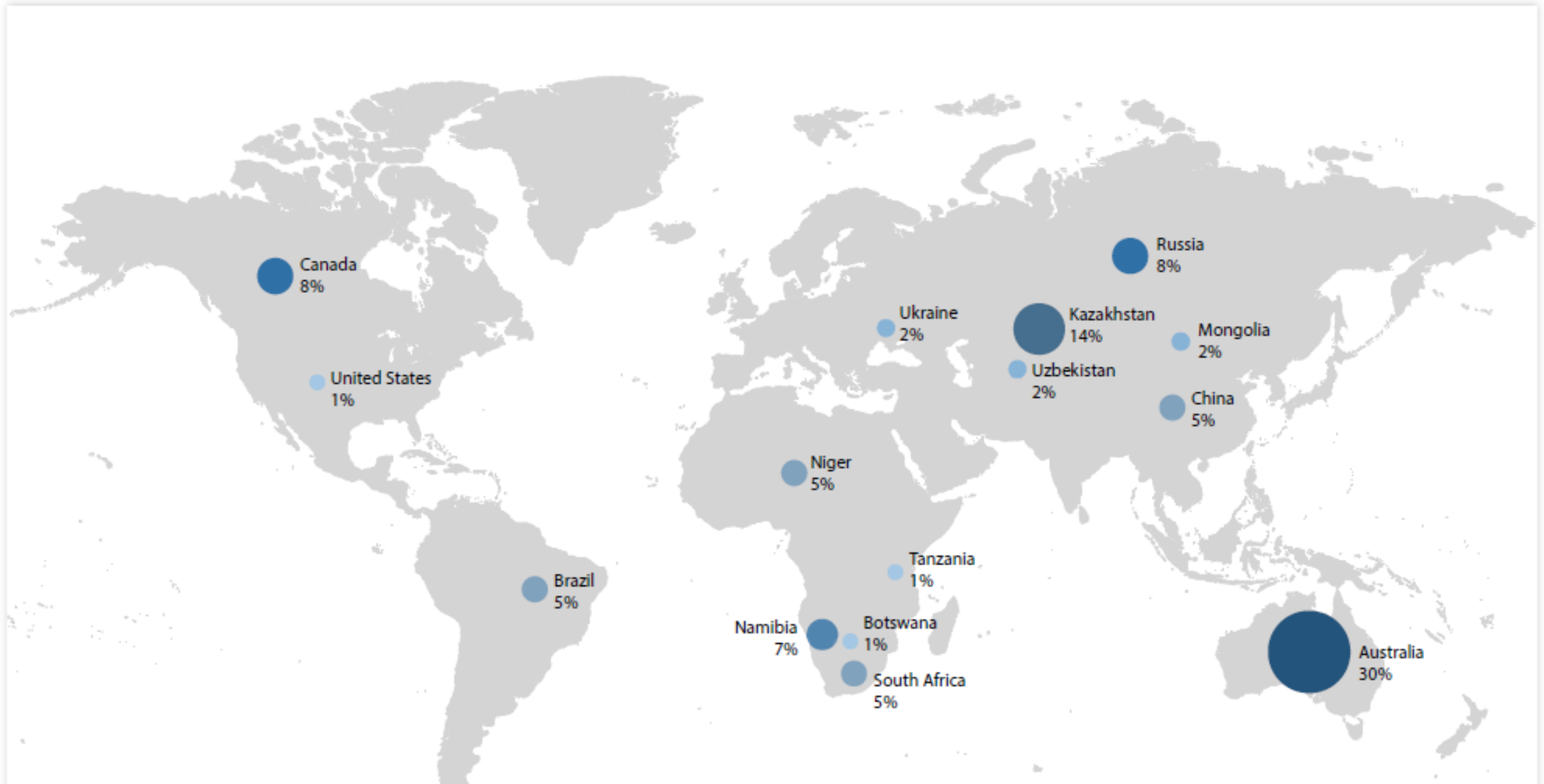
Dopad 50% nárůstu v ceně paliva na cenu vyráběné elektřiny

- Zdroj: *Global Energy Decisions, ERI, Inc.; IEA WEO 2006; in Steve Kidd, 2010, Nuclear Fuel: Myths and Realities*

Uran

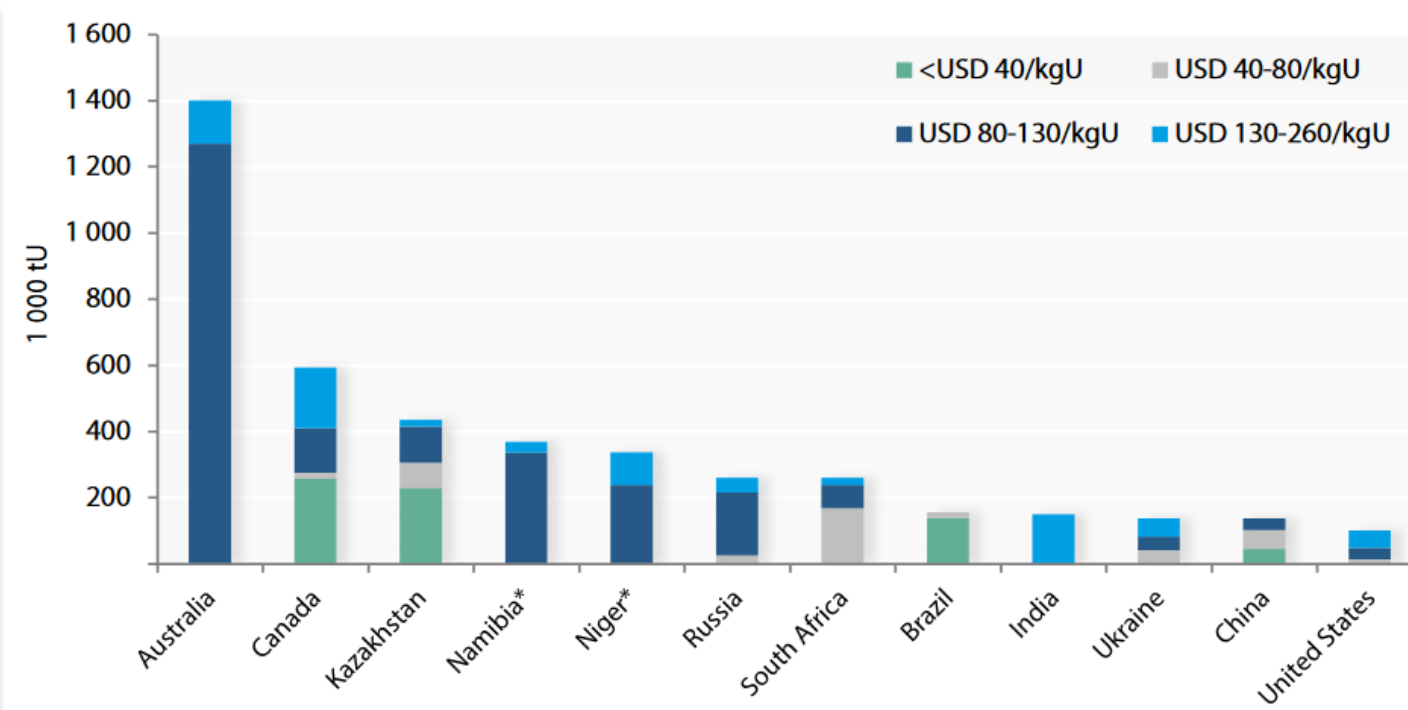
- Přírodní uran je relativně hojný a v zemské kůře poměrně rovnoměrně zastoupený , vyskytuje se 500x častěji, než zlato
- Žula (tvoří přibližně 75% zemské kůry) obsahuje přibližně 4 ppm uranu (0,0004 %).
- Uhlí má poměrně vysoký obsah uranu, koncentrace činí okolo 100 ppm (0,01 %), některá hnojiva obsahují až 400 ppm (0,04 %).
- Je-li koncentrace vyšší (0,03 % a více), hornině se říká ruda a může být těžena se ziskem.
 - Tradiční těžby (otevřené lomy, hlubinné doly)
 - Metody ISL

Figure 1.1. **Global distribution of identified resources**
(<USD 130/kgU as of 1 January 2017)



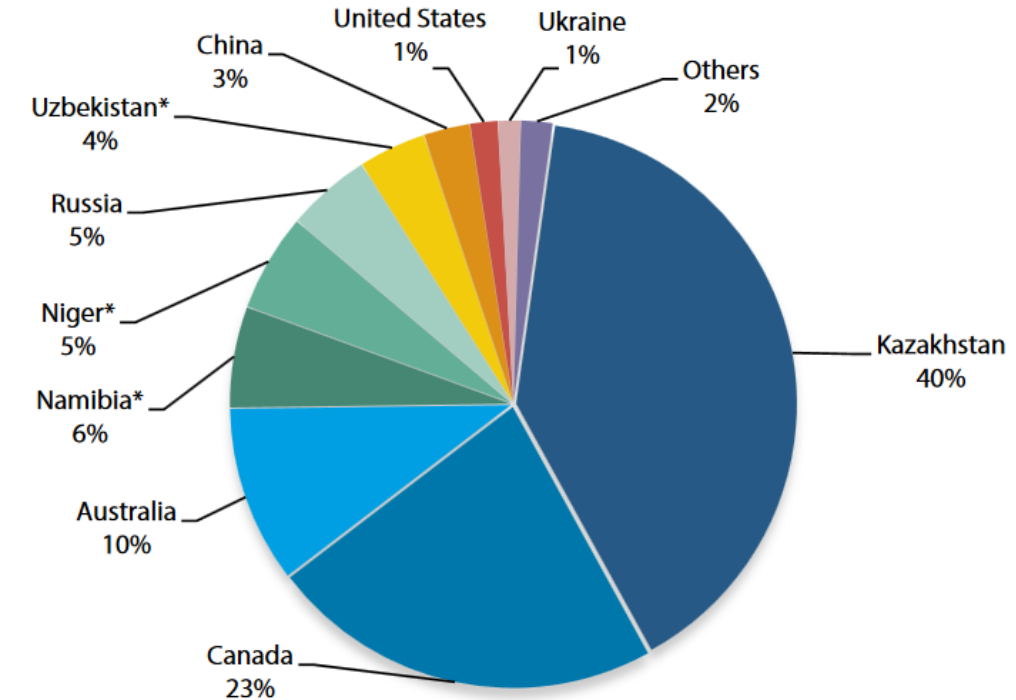
Uran

Figure 1.2. Distribution of reasonably assured resources among countries with a significant share of resources



* Secretariat estimate.

Figure 1.5. Uranium production in 2016: 62 071 tU

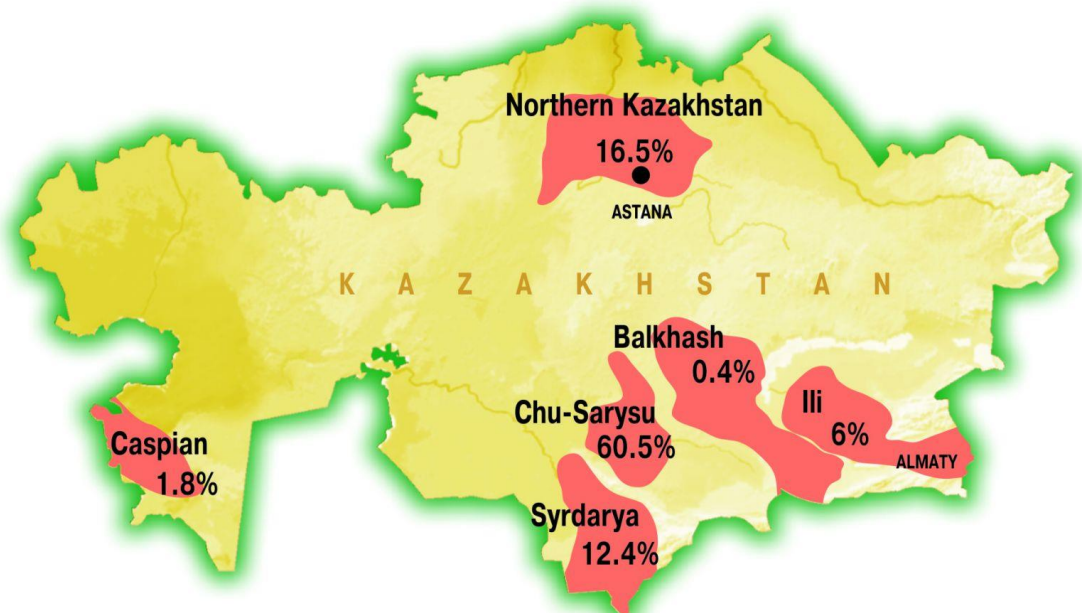


* NEA/IAEA estimate.

Table 1: The largest-producing uranium mines in 2018

Mine	Country	Main owner	Type	Production (tonnes U)	% of world
Cigar Lake	Canada	Cameco/Orano	underground	6924	13
Olympic Dam	Australia	BHP Billiton	by-product/ underground	3159	6
Husab	Namibia	Swakop Uranium (CGN)	open pit	3028	6
Inkai, sites 1-3	Kazakhstan	Kazatomprom/Cameco	ISL	2643	5
Rössing	Namibia	Rio Tinto	open pit	2102	4
Budenovskoye 2	Kazakhstan	Uranium One/Kazatomprom	ISL	2081	4
Tortkuduk	Kazakhstan	Orano/Kazatomprom	ISL	1900	4
SOMAIR	Niger	Orano	open pit	1783	3
Ranger	Australia	Rio Tinto/ERA	open pit	1695	3
Kharasan 2	Kazakhstan	Kazatomprom	ISL	1631	3
Top 10 total				26,946	51%

Uranium mines operate in some 20 countries, though in 2018 some 51% of world production came from just ten mines in four countries (see Table 1).















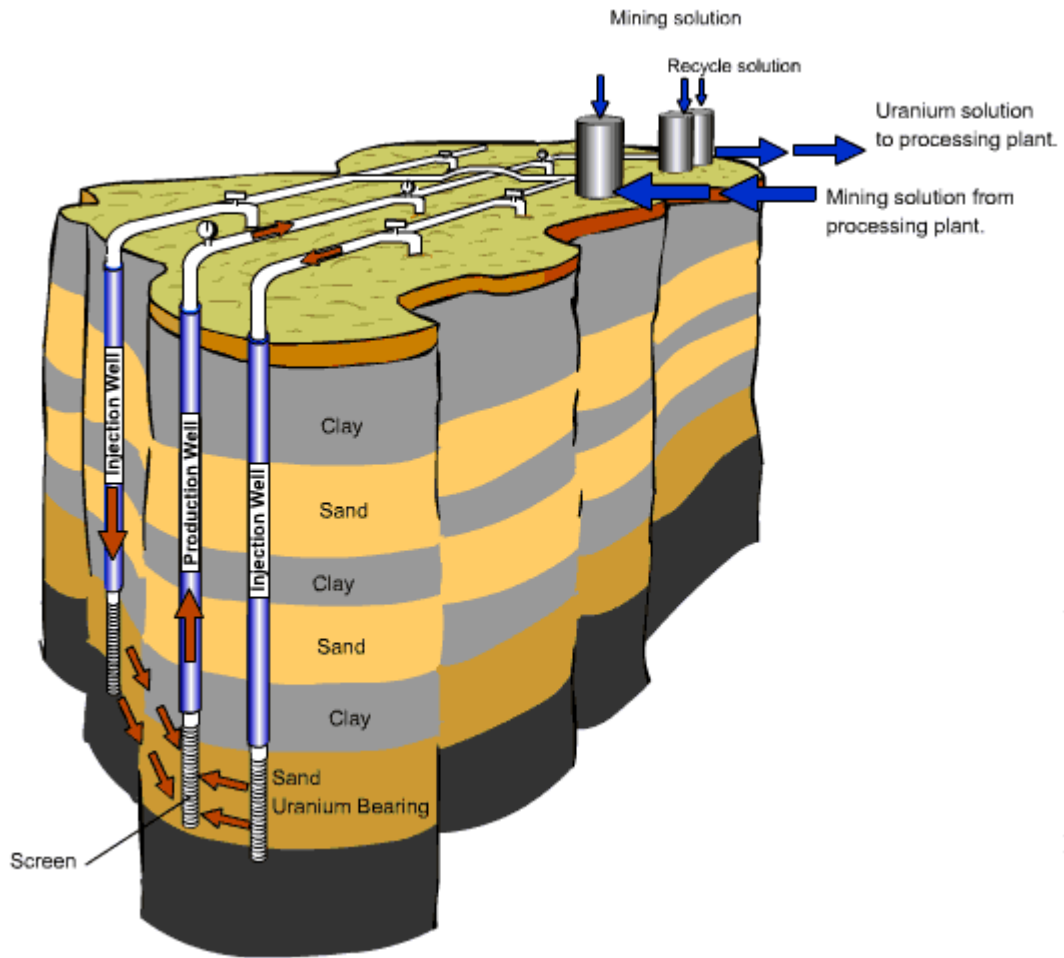






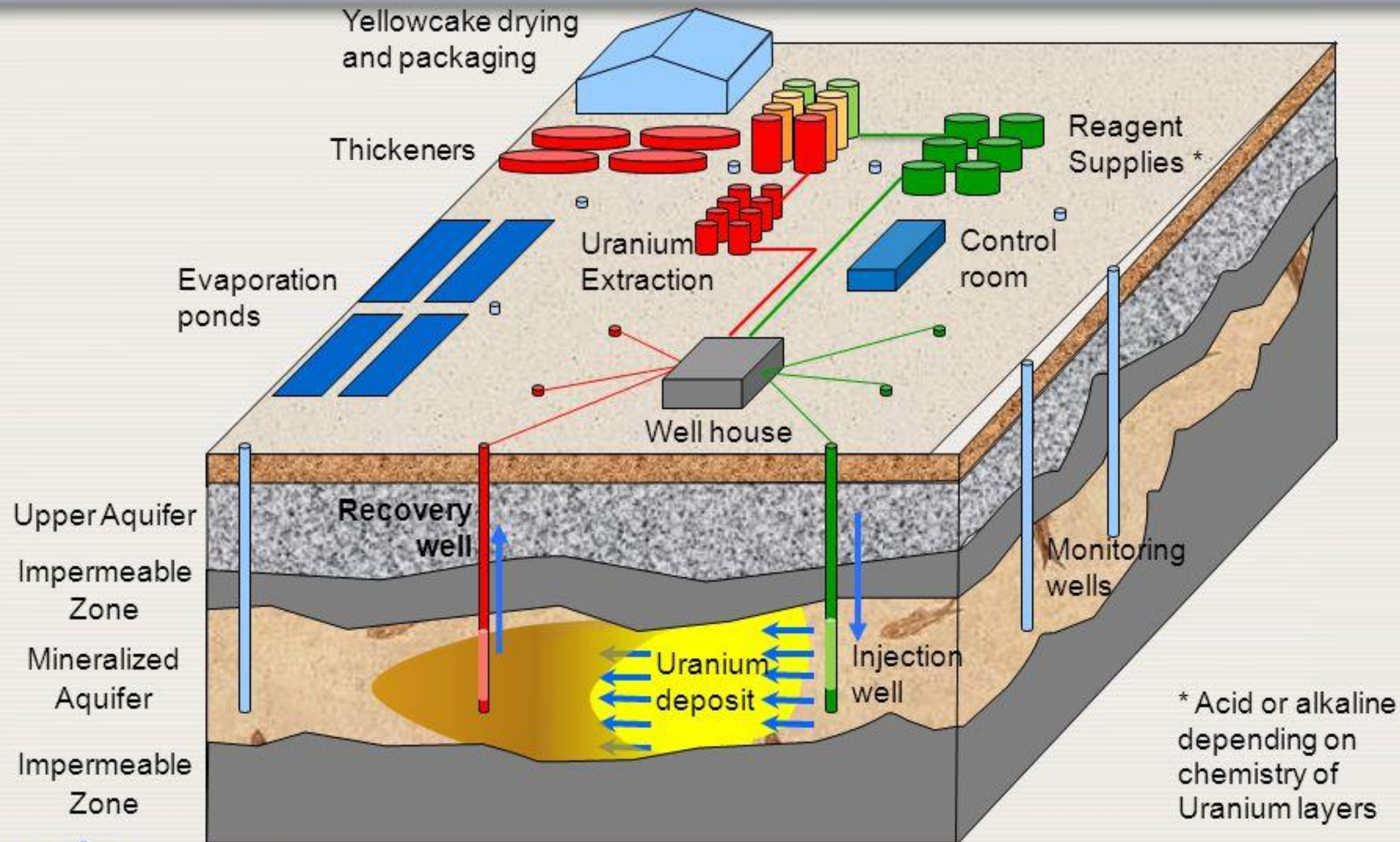
KONTROLOVANÉ PÁSMO
SE ZDROJÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ
VSTUP NEPOVOLANÝM OSOBÁM ZAKÁZÁN

Uran





DOSTAVNE
MISTO
JERABU



Perspektiva budoucí těžby

- Rostoucí obohacení (až do 5 % U235)
- Dostupnost kovu navázána na cenovou hladinu na trhu (uran z oceánů, rezervy vs. odhady)
- Podle Red Book je na světě 8 Mt potvrzených zásob uranu, nepočítaje zdroje s nákladovou cenou nad 260 USD/kg
- V poslední době vzniklo na 400 nových těžebních firem

- Uskladněný přírodní a obohacený uran
- RepU (je-li drahý U = tlak na přepracování)
- P239 (použité palivo, zbraně)
- Down-blended (ředěný) zbraňový uran
- Obohacování odpadu (tzv. tails) z obohacování (aktuálně 0,25-0,3 % U235)
- Vyšší obohacení (je-li drahý U = tlak na vyšší obohacení/izolaci U235)
- Množivé reaktory (U238 -> P239)
- Jaderná fúze (?)

Zpracování

- Ruda obvykle obsahuje okolo 0.1 % uranu, často i méně.
- V této podobě je přeprava jednoduše příliš nákladná.
- Přepracovací závody jsou tedy v těsné blízkosti dolů.
- Uranová ruda je očištěna, rozemleta a vylouhována kyselinou (sírovou). Po vysušení vzniká uranový koncentrát U_3O_8 (žlutý koláč).
- Koncentrace uranu v koncentrátu je 80 %, v této podobě je naplněn do 200 litrových sudů a připraven k transportu.
- Ve zbytku horniny se nacházejí zbytky rozpustného roztoku a většina radioaktivity (vázaná na produkty přirozeného radioaktivního rozpadu). Tyto zbytky se ukládají buď zpět do dolů nebo do odkališť, kde jsou uměle odděleny od životního prostředí.











Konverze

- Obohacení lze aktuálně provést pouze v plynném skupenství.
- U_3O_8 lze přímo převést do UO_3 , který lze použít jako palivo v některých specifických reaktorech (PHWR).
- Většina reaktorů ale vyžaduje obohacení. U_3O_8 je tedy konvertováno do UF_6 , který je za normálních podmínek v plynném stavu.
- Plyn je napumpováno do kovových válců, ve kterých dochází ke změně skupenství. V těchto válcích se produkt transportuje.

Konverze (a rekonverze)

Table 3. Commercial UF₆ conversion facilities

Company	Nameplate capacity in 2018 (tU as UF ₆)	Share of global capacity (%)
Atomenergoprom* (Russia)	18 000	31.3
Comurhex** II (France)	15 000	26.0
Cameco (Canada)	12 500	21.7
ConverDyn*** (United States)	7 000	12.2
CNNC (China)	5 000	8.7
IPEN (Brazil)	100	0.1
Total nameplate capacity	57 600	100

Zdroj: Euratom Supply Agency

China's capacity is expected to grow considerably in 2025 and beyond

Plan to develop Ulba plant in Kazakhstan in 2020 (6,000 tU)

Obohacení

Zdroj: Euratom Supply

Agency; WNA

SWU calculator:

[http://www.wise-](http://www.wise-uranium.org/nfcue.html)

[uranium.org/nfcue.html](http://www.wise-uranium.org/nfcue.html)

World enrichment capacity – operational and planned (thousand SWU/yr)

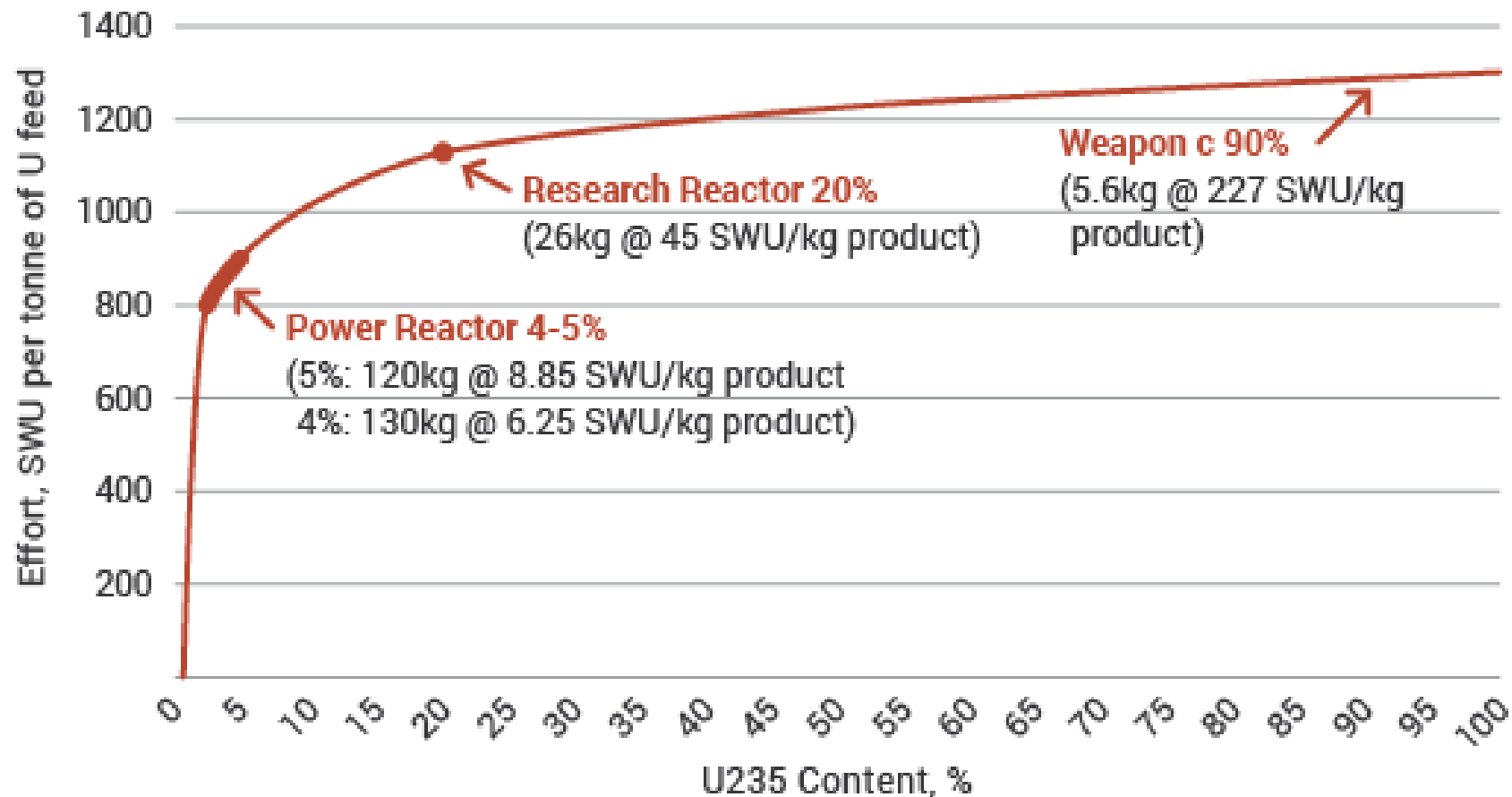
Country	Company and plant	2013	2015	2020
France	Areva, Georges Besse I & II	5500	7000	7500
Germany-Netherlands-UK	Urenco: Gronau, Germany; Almelo, Netherlands; Capenhurst, UK.	14,200	14,400	14,900
Japan	JNFL, Rokkaasho	75	75	75
USA	USEC, Piketon	0*	0	0
USA	Urenco, New Mexico	3500	4700	4700
USA	Areva, Idaho Falls	0	0	0
USA	Global Laser Enrichment, Paducah	0	0	0
Russia	Tenex: Angarsk, Novouralsk, Zelenogorsk, Seversk	26,000	26,578	28,663
China	CNNC, Hanzhun & Lanzhou	2200	5760	10,700+
Other	Various: Argentina, Brazil, India, Pakistan, Iran	75	100	170
	Total SWU/yr approx	51,550	58,600	66,700
	Requirements (<i>WNA reference scenario</i>)	49,154	47,285	57,456

Table 4. Operating commercial uranium enrichment facilities, with approximate 2018 capacity

Company	Nameplate capacity (tSW)	Share of global capacity (%)
TVEL (Russia)	28 416	45.0
Urenco (UK/Germany/Netherlands/United States)	18 758	32.3
Orano (France)	7 500	12.7
CNNC (China)	5 210	9.8
Others* (CNEA, INB, JNFL)	188	0.3
World total	60 072	100

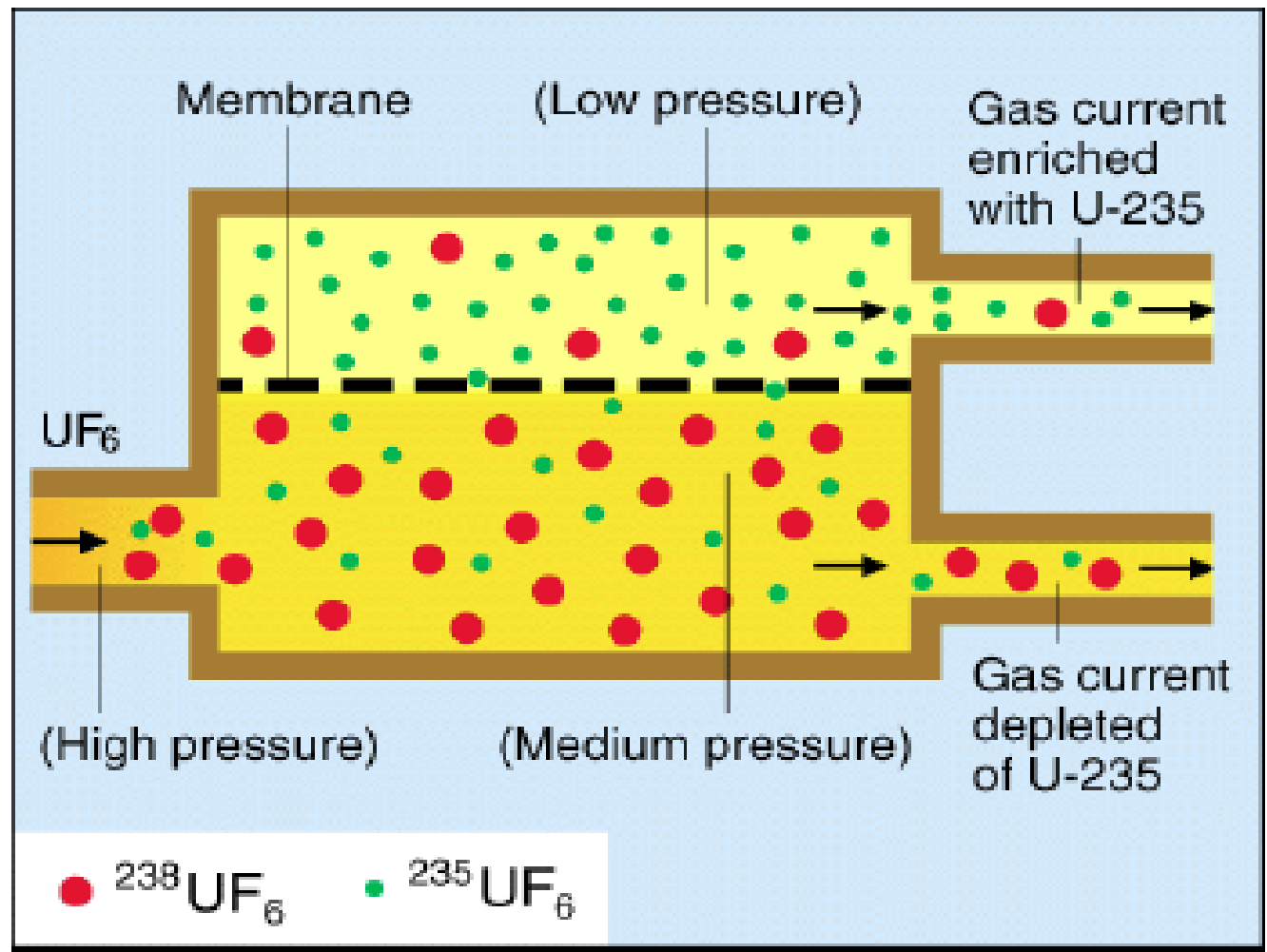
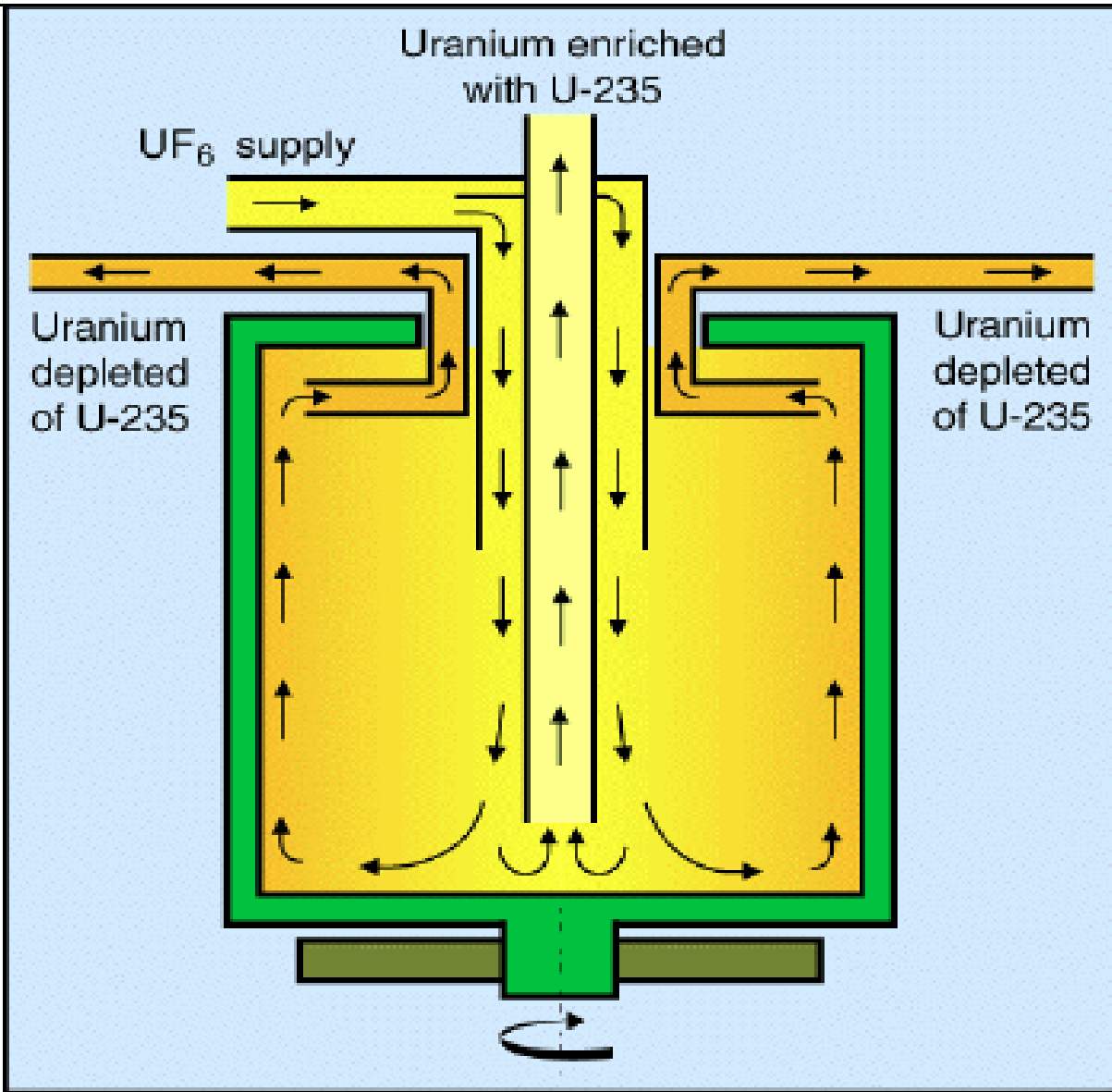
Obohacení

Uranium Enrichment and Uses



Obohacení

Supply source:	2000	2010	2015	projected 2020
Diffusion	50%	25%	0	0
Centrifuge	40%	65%	100%	93%
Laser	0	0	0	3%
HEU ex weapons	10%	10%	0	4%



Obohacení

SWU calculator:

<http://www.wise-uranium.org/nfcue.html>

Nuclear Fuel Cost Calculator:

<http://www.wise-uranium.org/nfcc.html>



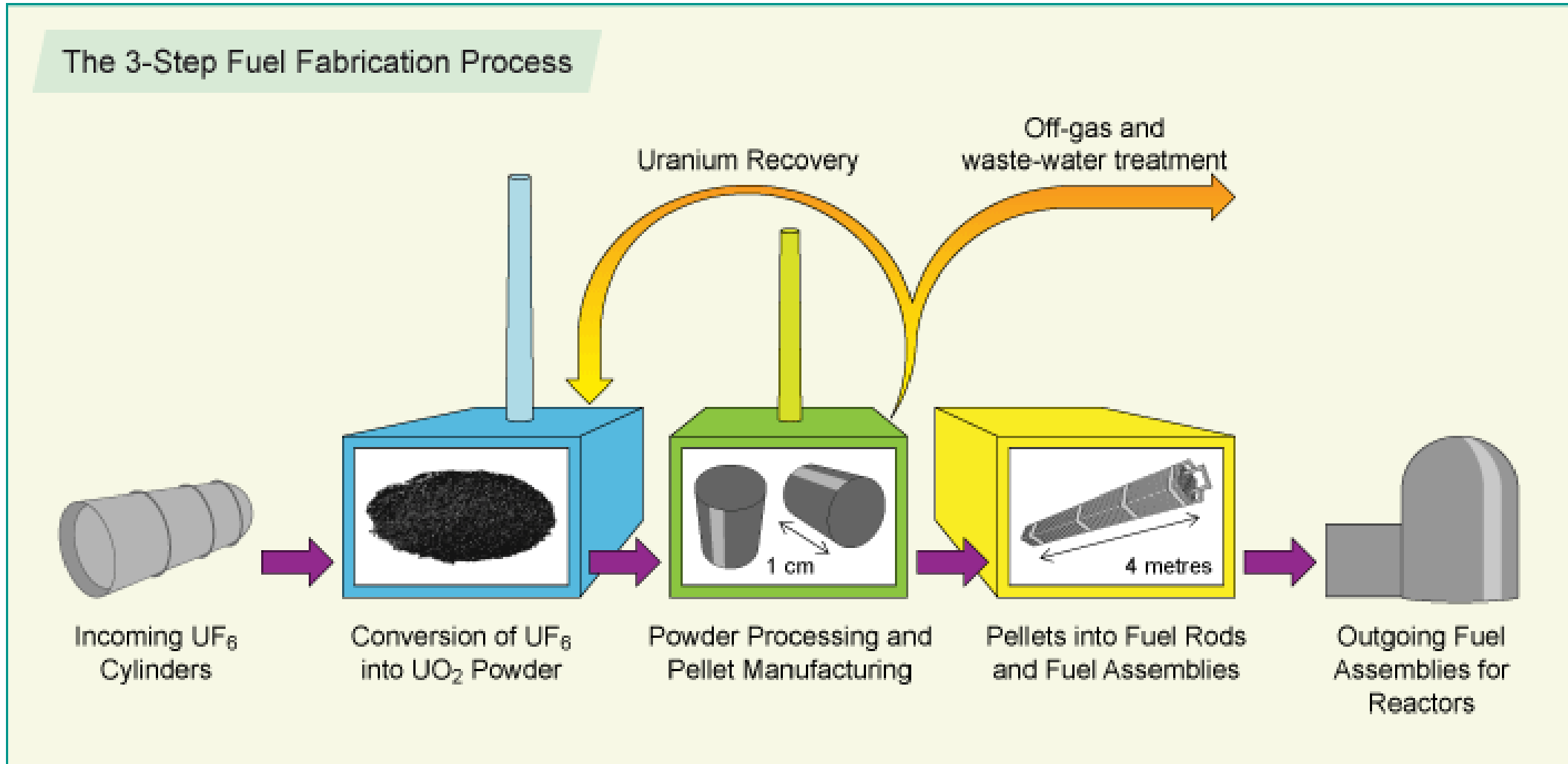


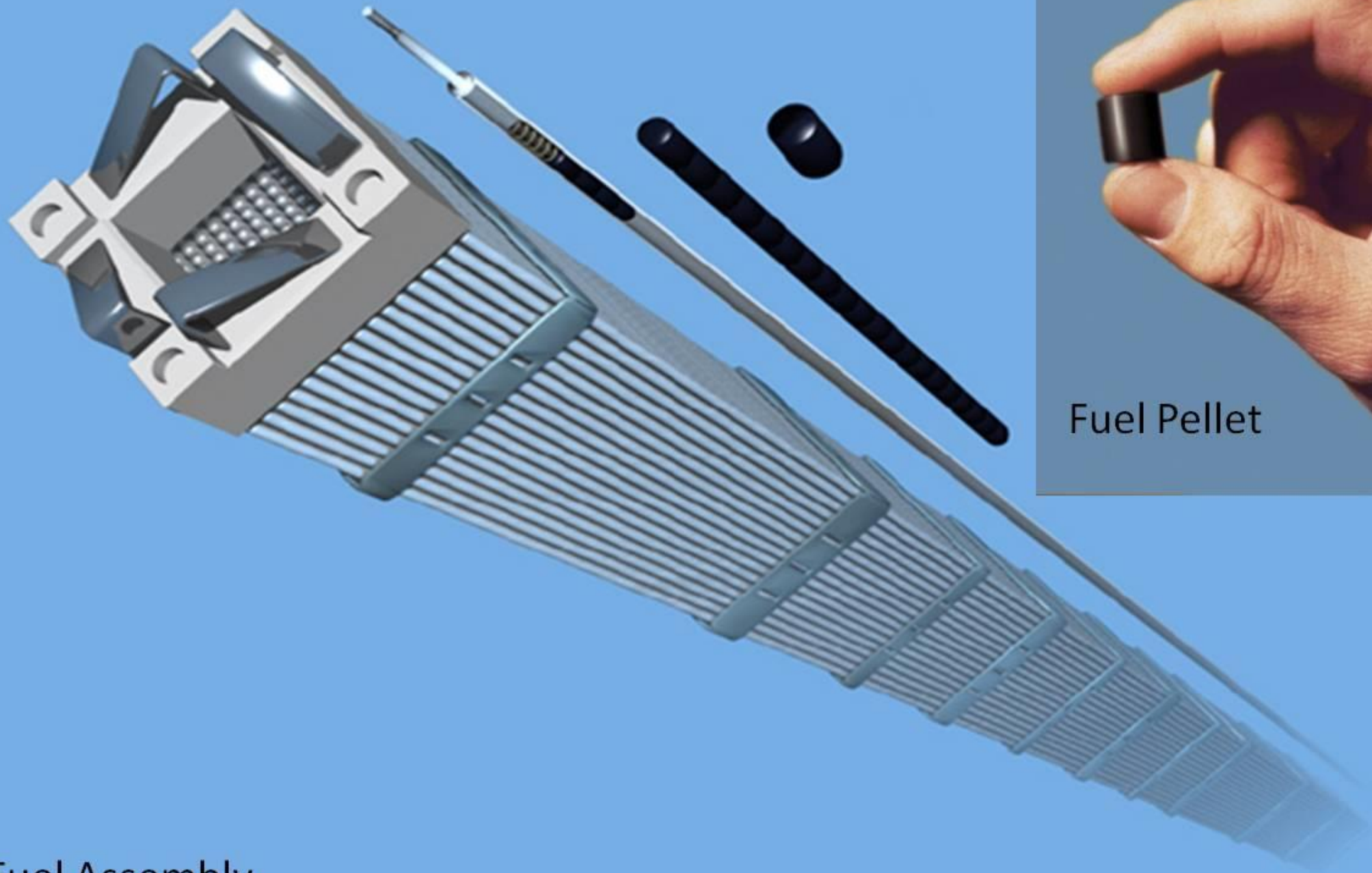
Fabrikace

Rozdíl oproti předchozím krokům:

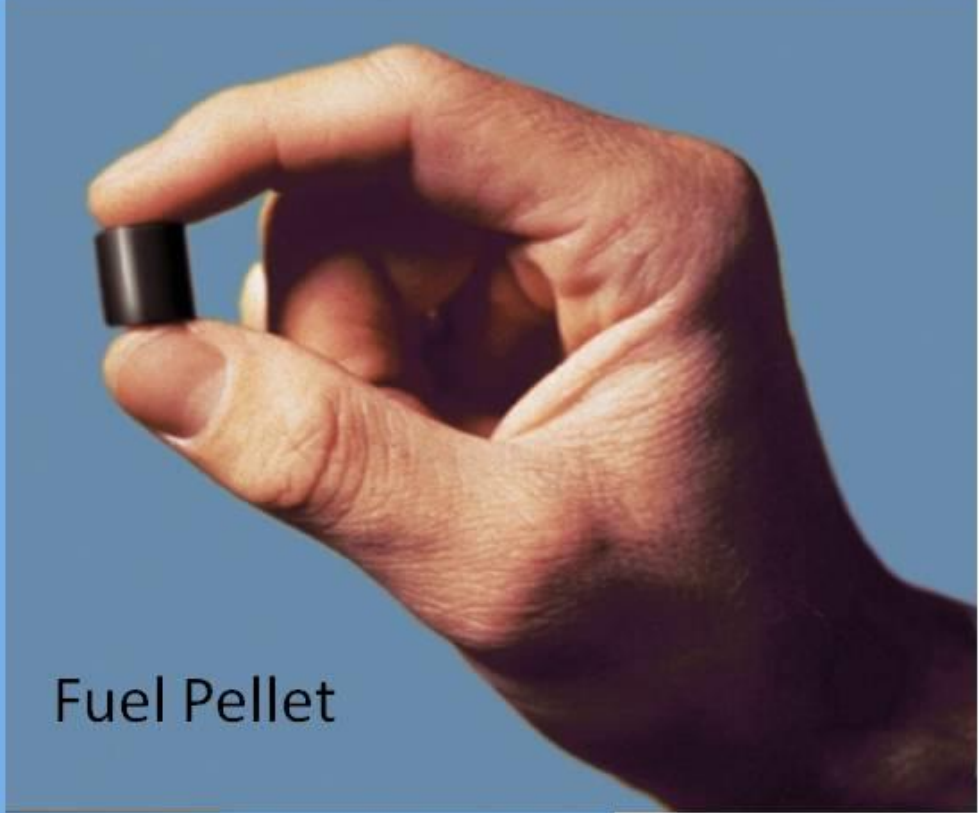
- 1) Fabrikace je vysoce specializovaná služba, nikoliv komodita
- 2) K výrobě dochází na základě veřejných soutěží a podle přesných požadavků zákazníka
- 3) Kvalita paliva je klíčová pro provoz elektrárny. Finanční implikace sníženého výkonu, problémů či odstávky rychle převáží jakékoliv potenciální benefity levnějšího produktu.

Fabrikace





Fuel Assembly



Fuel Pellet











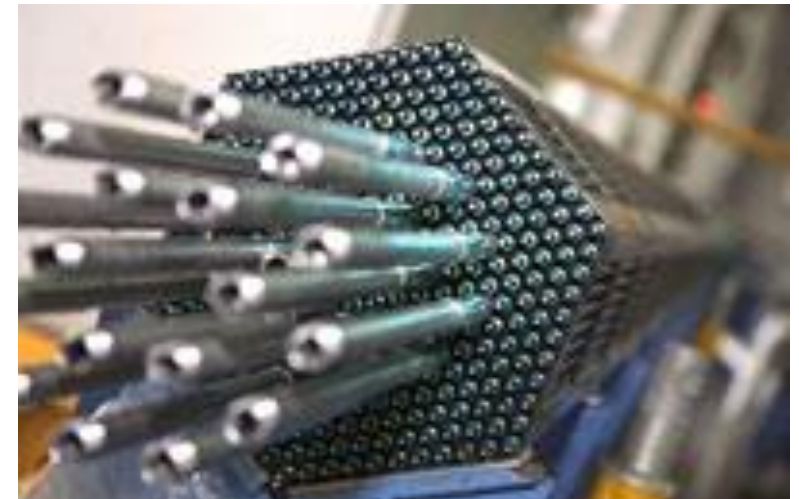
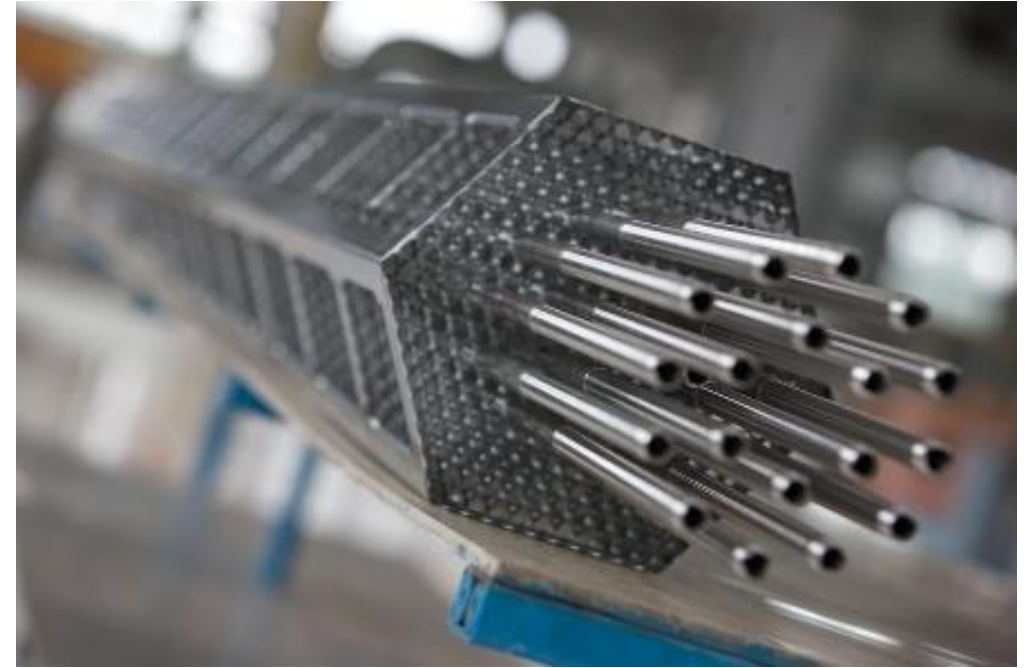


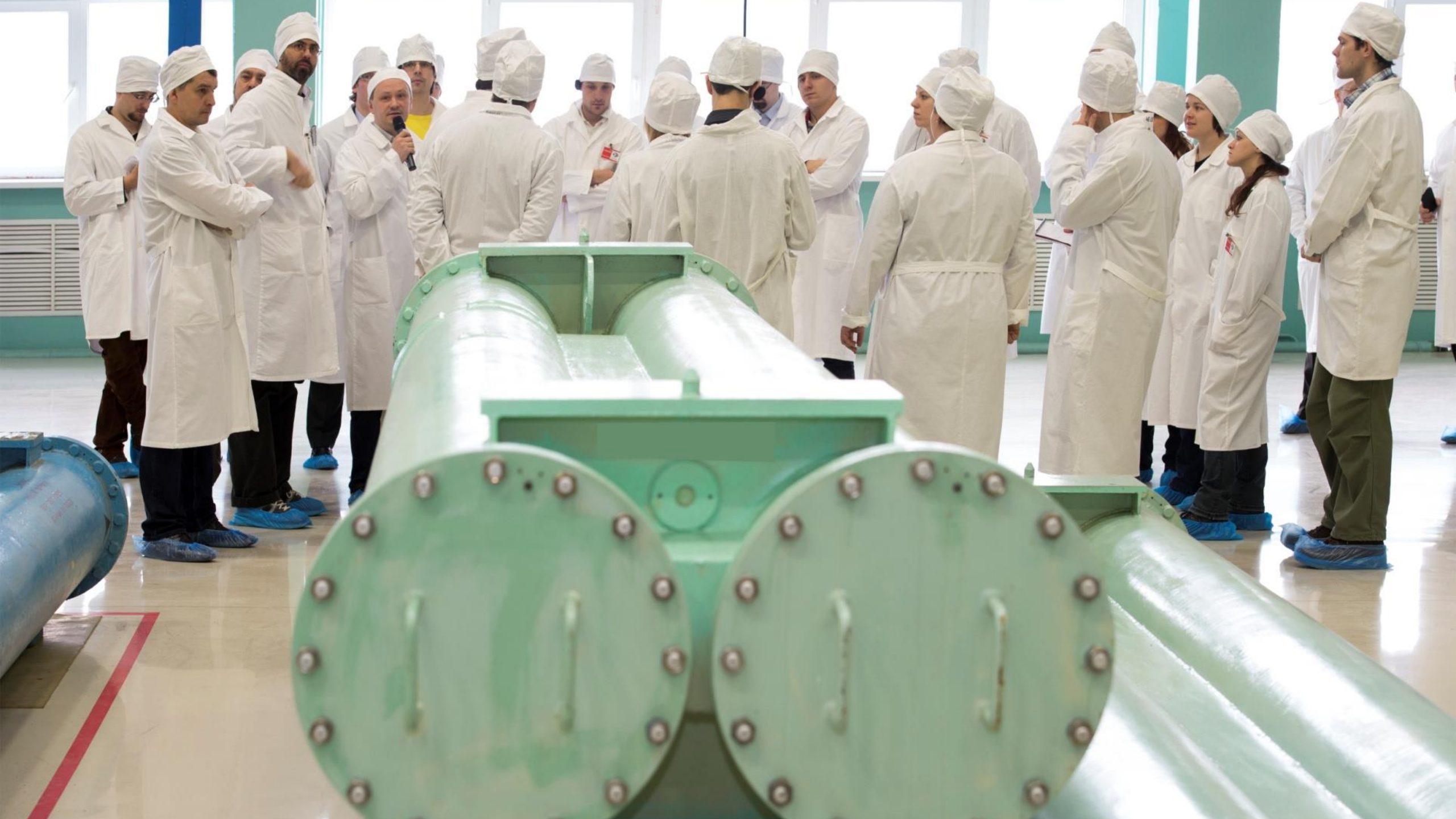




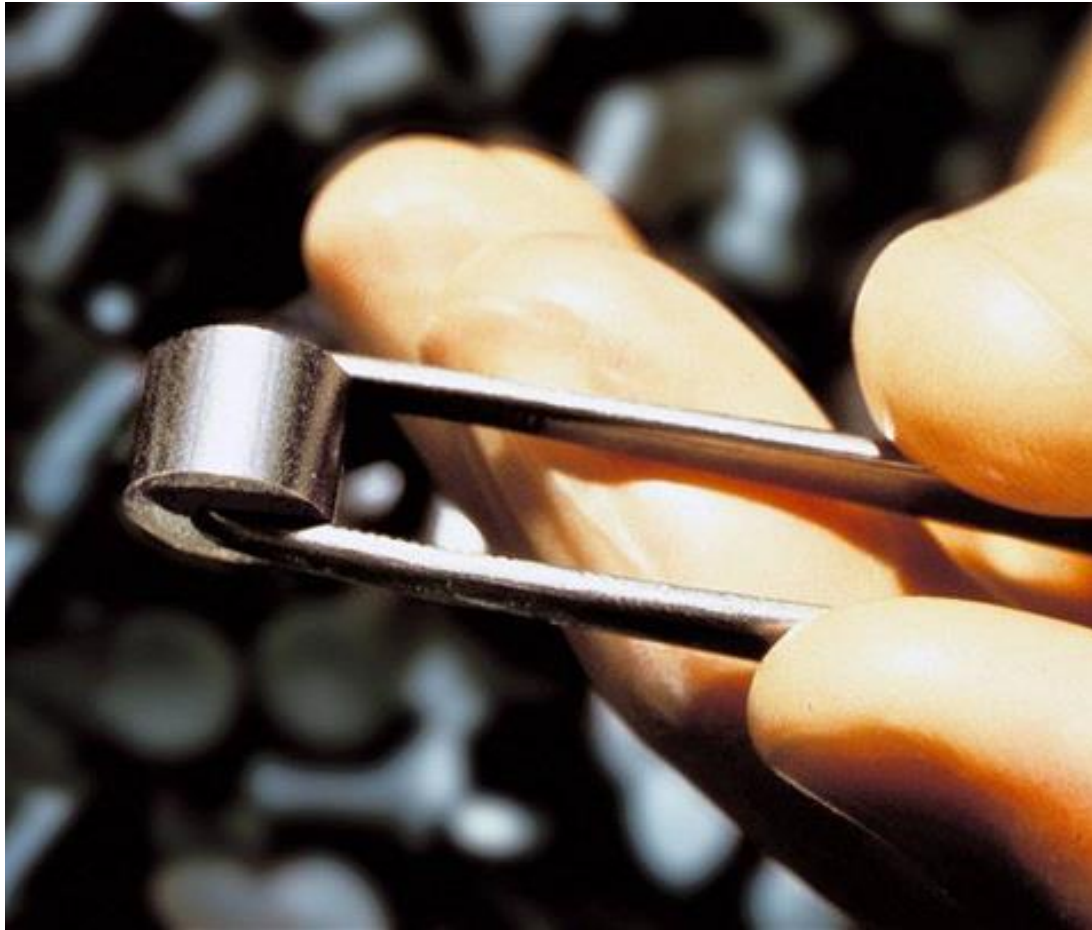


Fabrikace

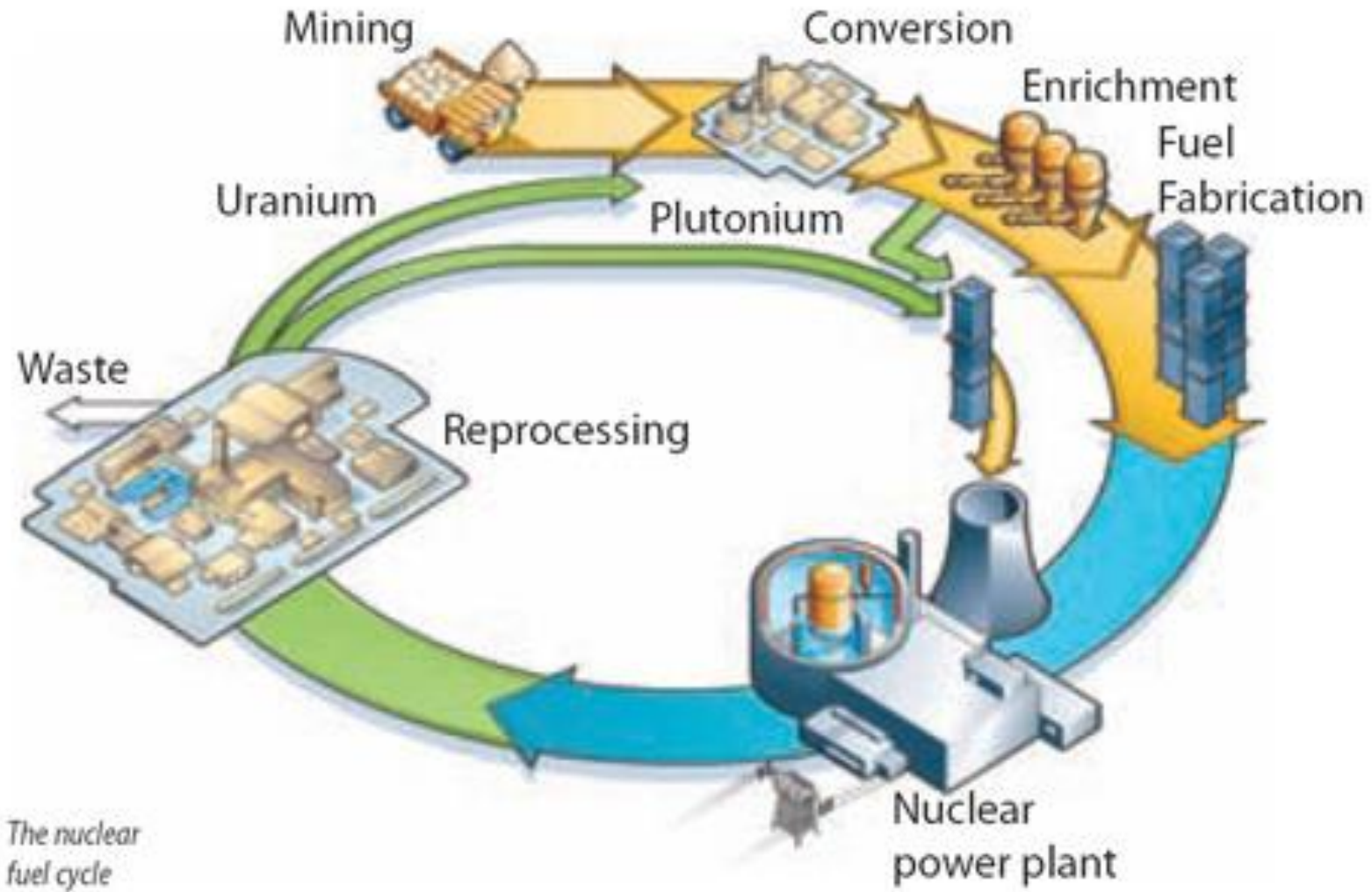




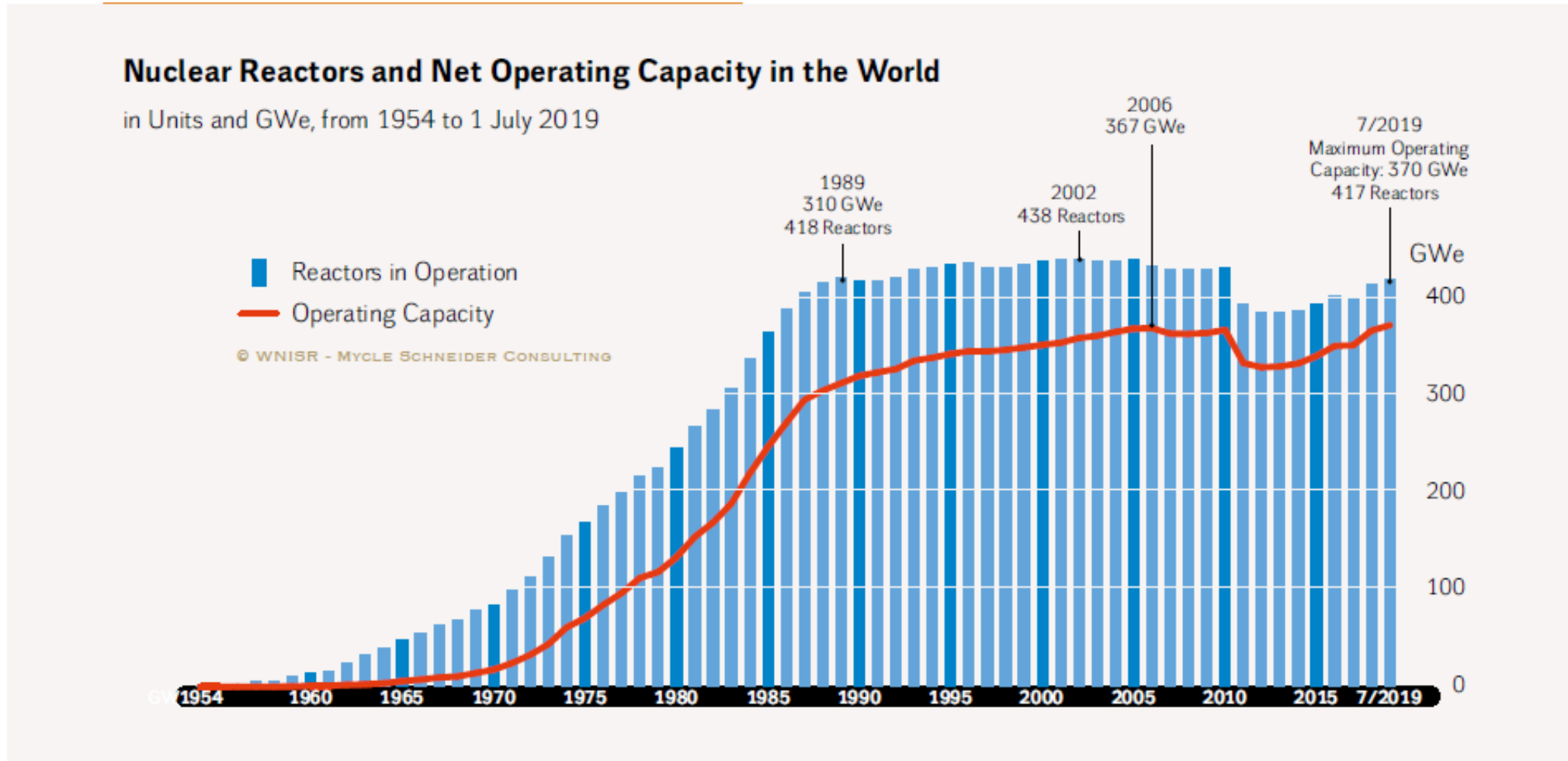
Fabrikace



Jaderný palivový cyklus



Světová reaktorová flotila

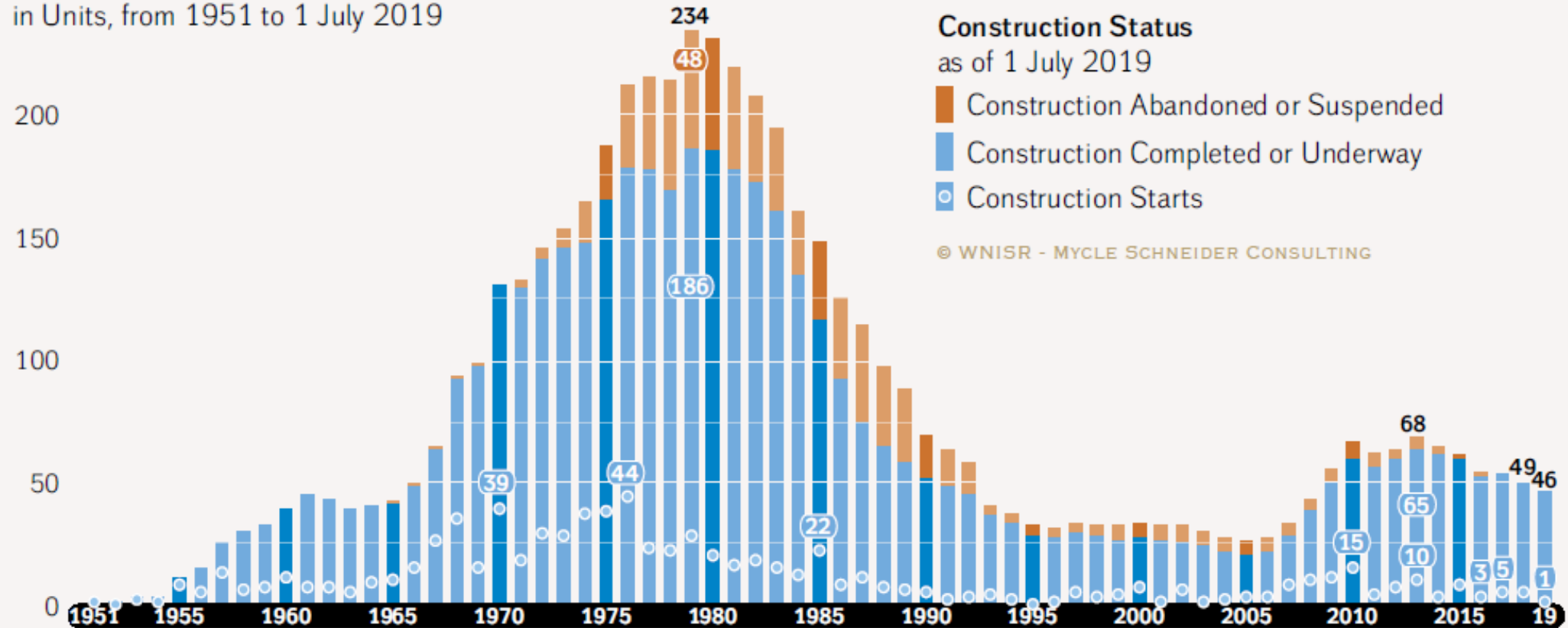


Sources: WNISR, with IAEA-PRIS, 2019

Světová reaktorová flotila

Reactors Under Construction in the World

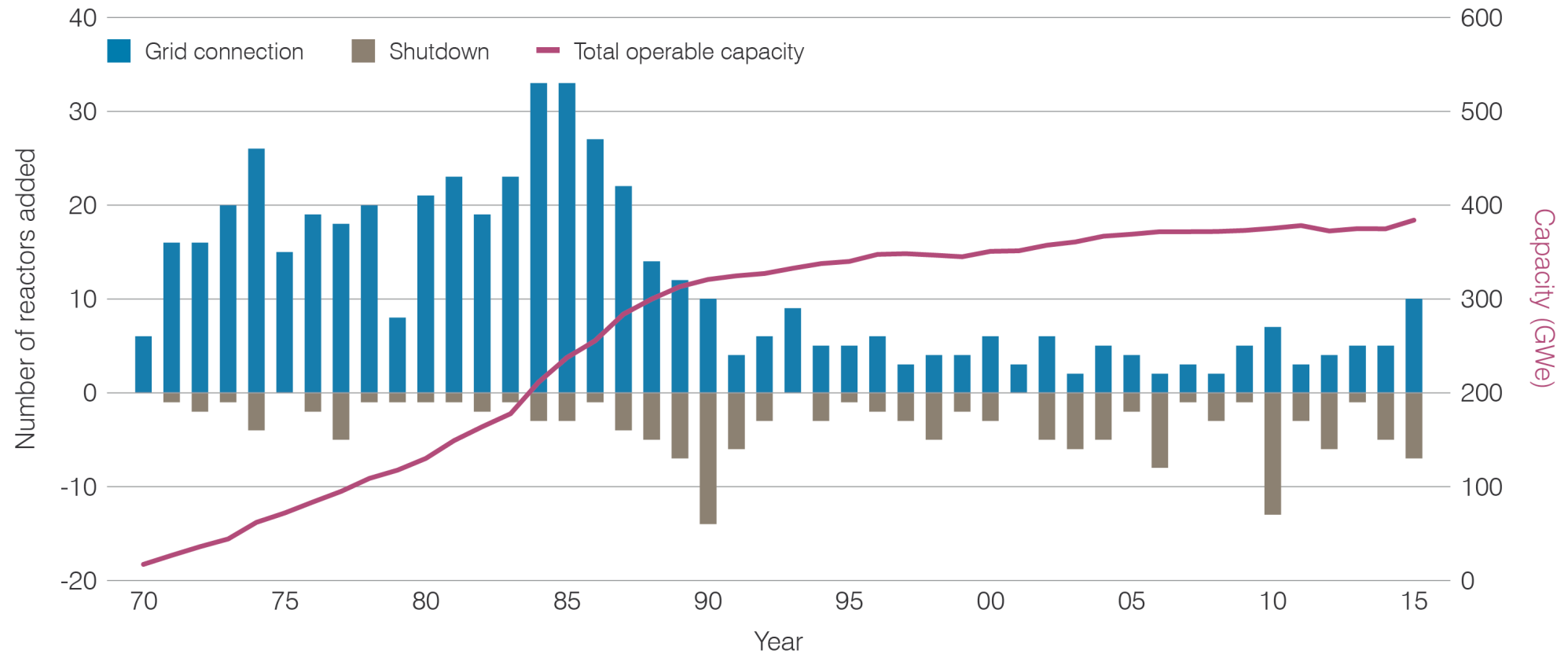
in Units, from 1951 to 1 July 2019



Světová reaktorová flotila

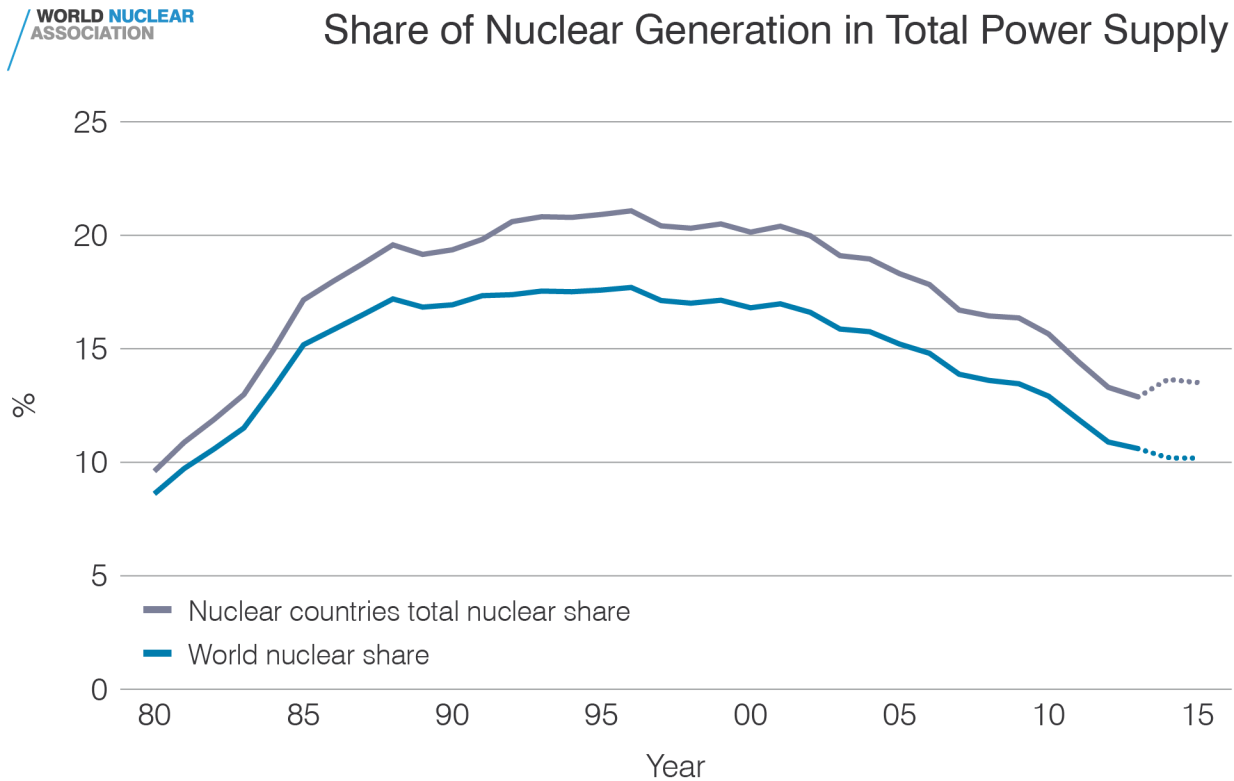


Reactor Construction and Shutdown

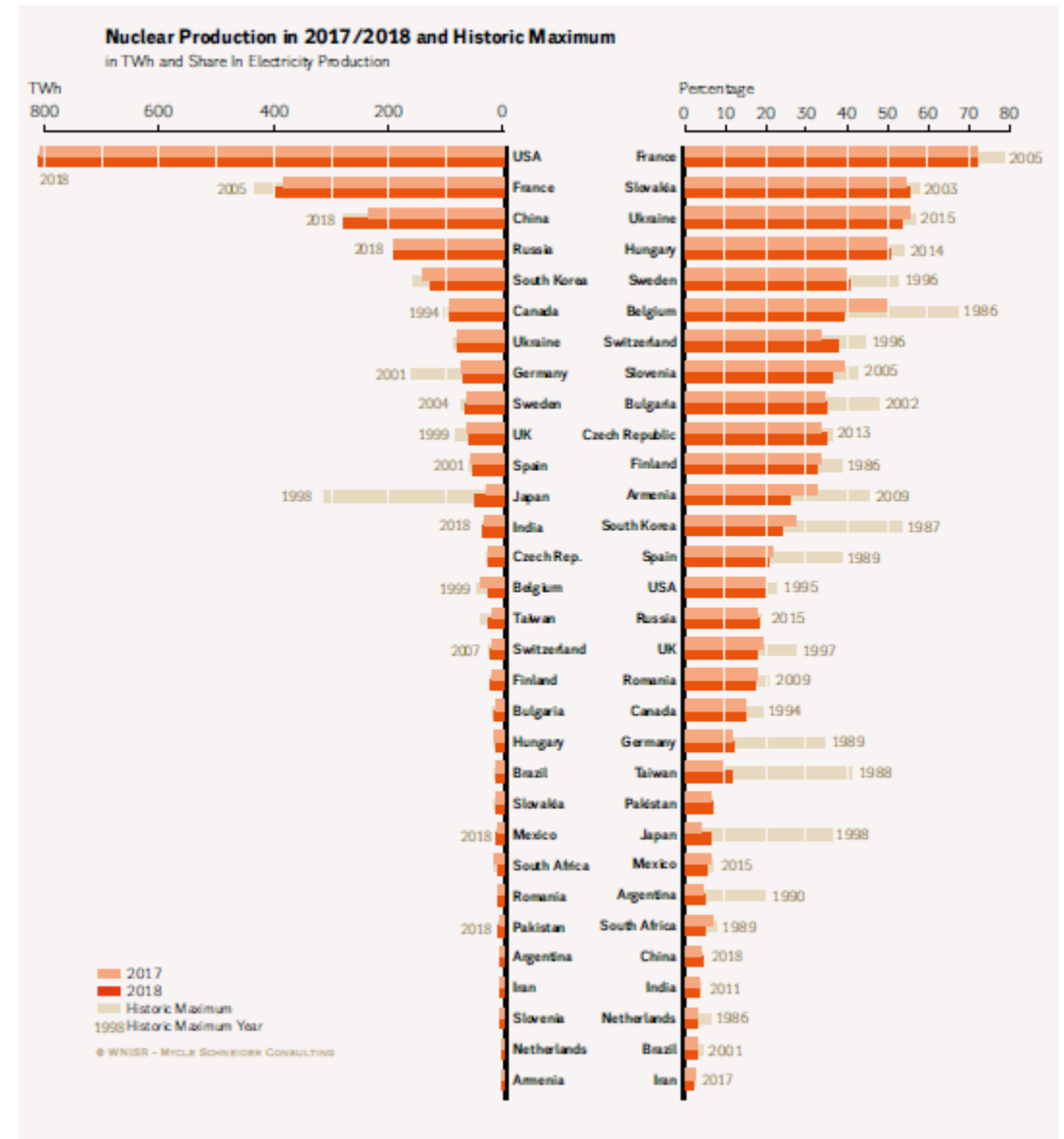


Source: IAEA PRIS

Světová reaktorová flotila



Source: IEA, World Energy Outlook 2014; IAEA PRIS; World Nuclear Association (for 2014-15 data)

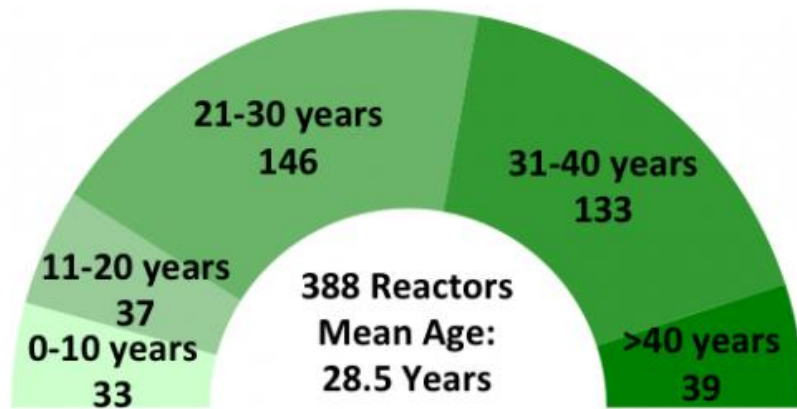


Source: IAEA-PRIS, 2019

Nuclear Reactors "Under Construction" as of July 2019

Country	Units	Capacity (MW net)	Construction Starts	Grid Connection	Units Behind Schedule
China	10	8 800	2012 - 2017	2020 - 2023	2-3
India	7	4 824	2004 - 2017	2019 - 2023	5
Russia	5	3 379	2007 - 2019	2019 - 2023	3
UAE	4	5 380	2012 - 2015	2020 - 2023	4
South Korea	4	5 360	2012 - 2018	2019 - 2024	4
Belarus	2	2 218	2013 - 2014	2019 - 2020	1-2
Bangladesh	2	2 160	2017 - 2018	2023 - 2024	0
Slovakia	2	880	1985	2020 - 2021	2
USA	2	2 234	2013	2021 - 2022	2
Pakistan	2	2 028	2015 - 2016	2020 - 2021	0
Japan	1	1 325	2007	?	1
Argentina	1	25	2014	2021	1
UK	1	1 630	2018	2025	0
Finland	1	1 600	2005	2020	1
France	1	1 600	2007	2022	1
Turkey	1	1 114	2018	2024	0
Total	46	44 557	1985 - 2019	2019 - 2025	27-29

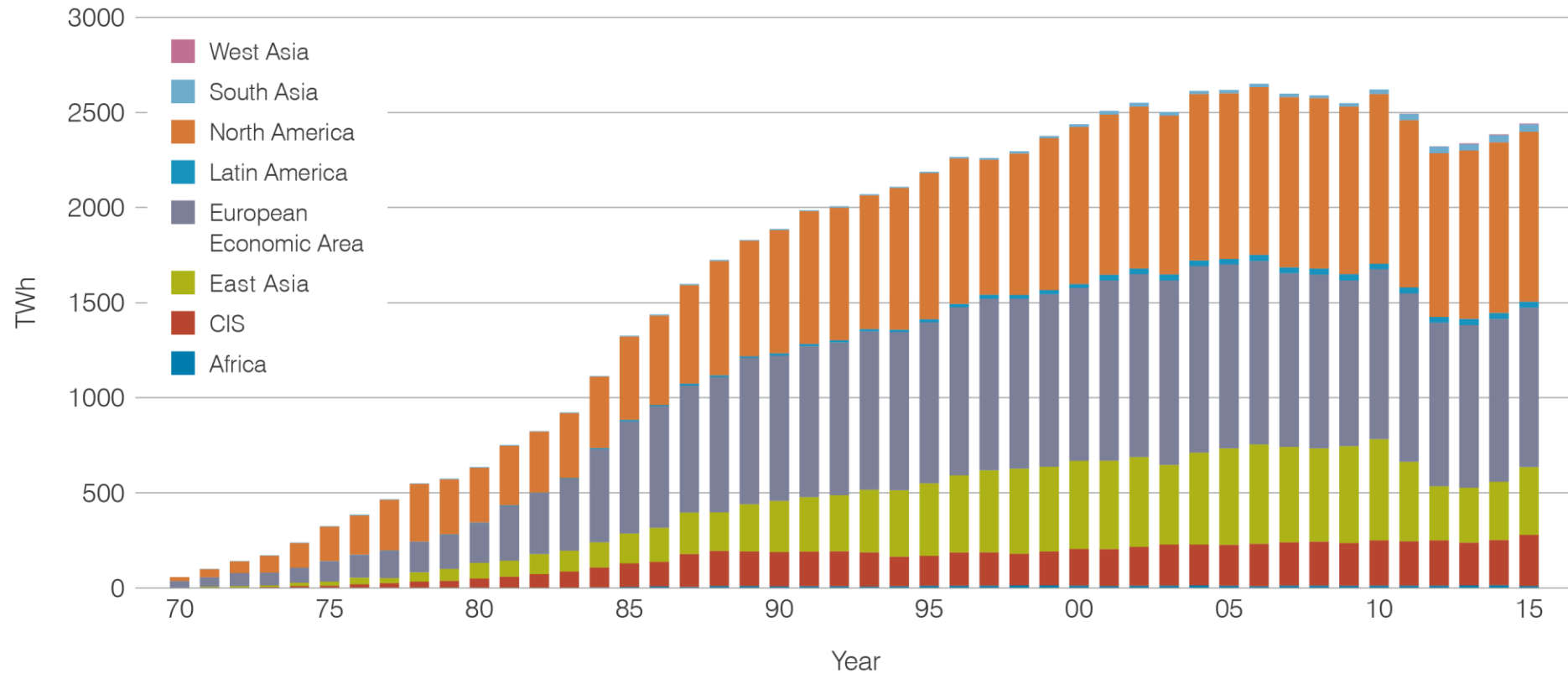
Age of World Nuclear Fleet as of 1 July 2014



Světová reaktorová flotila

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS