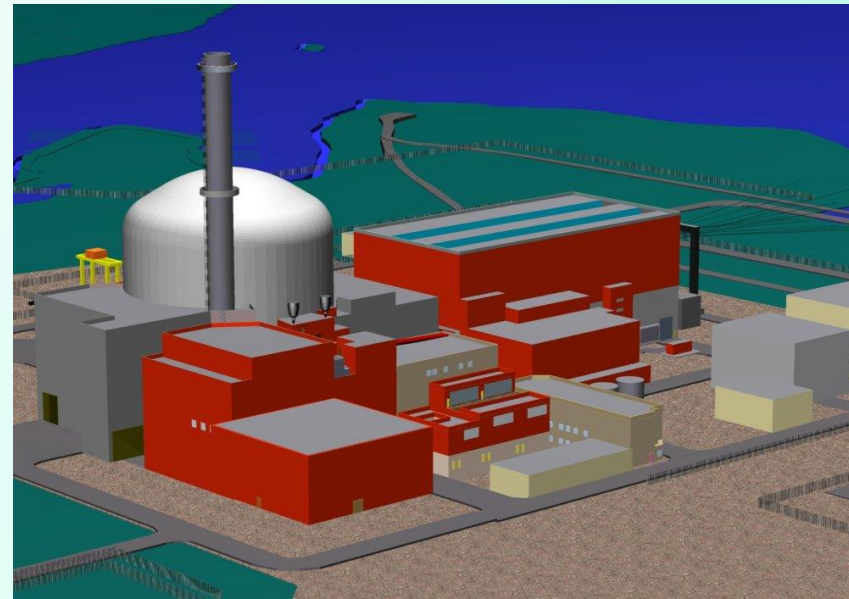


# Перспективні напрями розвитку атомної енергетики України

**В. І. Борисенко**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України*



# Перспективні напрями розвитку атомної енергетики України

1. Стан ядерної енергетики в Україні
2. Прогнозування споживання електроенергії
3. Світові тенденції в ядерній енергетиці
4. Сучасні реакторні установки покоління III+
5. Інноваційні реакторні установки Generation IV
6. Проекти малих модульних реакторів
7. Науково-технічні підходи щодо оптимального вибору реакторних технологій
8. Техніко-економічні показники сучасних РУ
9. Порівняння вартості реакторних технологій
10. Висновки

# Перша 10-ка країн за обсягами виробництва електроенергії на АЕС у 2021 р.



№	Країна	Вироблено електроенергії, млрд. кВт·г	Встановлена потужність, ГВт (кількість енергоблоків)
1	США	787,4	94,7 (92)
2	Китай	407,1	52,2 (55)
3	Франція	360,7	61,4 (56)
4	РФ	222,4	27,7 (37)
5	Корея	150,2	24,4 (25)
6	Україна	86,2	13,1 (15)
7	Канада	73,6	13,6 (19)
8	Японія	61,2	16,3 (17)
9	Іспанія	54,1	7,1 (7)
10	Швеція	51,0	6,9 (6)

Найпотужніші у світі **енергоблоки** з

EPR-1750 на

№ 1, 2 АЕС TAISHAN у Китаї

№ 3 OLKILUOTO у Фінляндії

Найпотужніші у світі **АЕС**

Касівадзакі-Каріва - 8,2 ГВт

АЕС Брюс - 6,2 ГВт

Запорізька АЕС - 6,0 ГВт

Євросоюз – 104 енергоблоки, 101,9 ГВт, частка - 25 %.

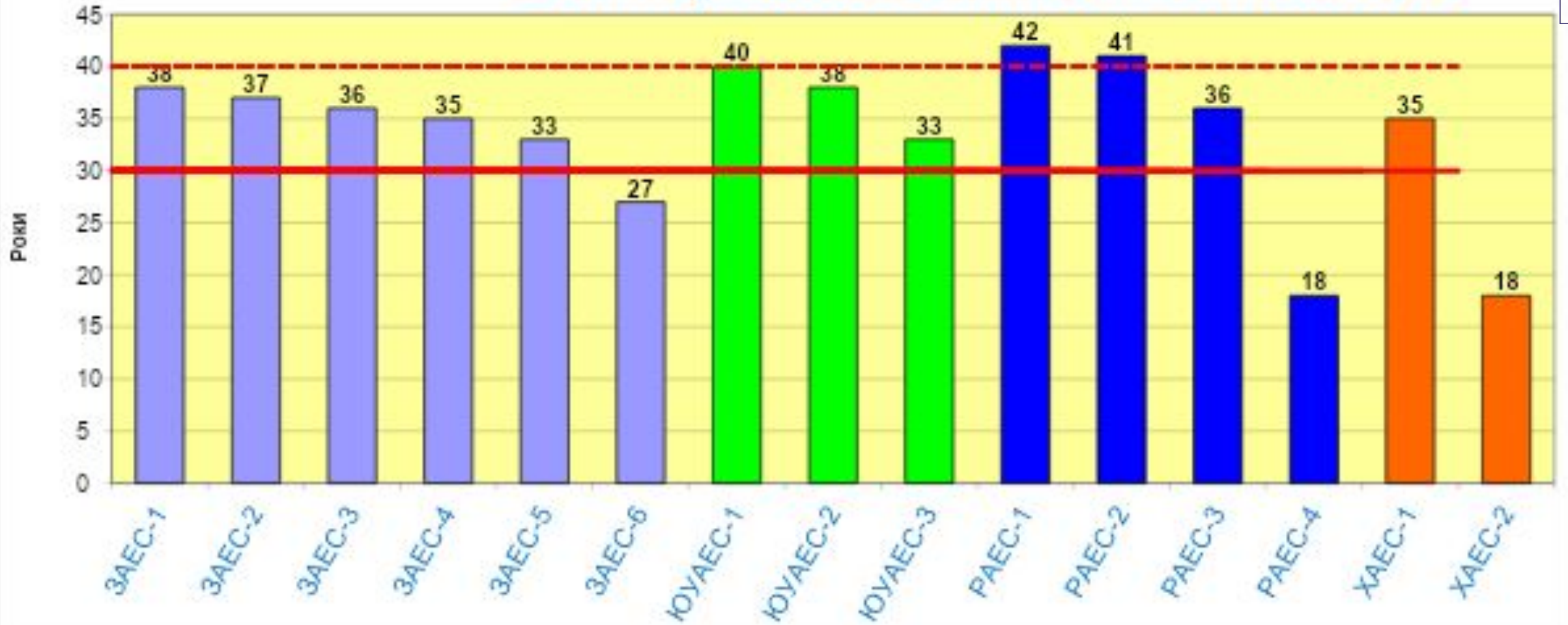
США – 92 енергоблоки, 94,7 ГВт, частка - 19,6%

Франція – 56 енергоблоків, 61,4 ГВт, частка ~ 70%

Рік	Встановлена потужність, ГВт	Кількість РУ, шт.	Кількість РУ на кінець року, шт.	Зміна кількості РУ за рік
2002	358,5	444	439	-5
2003	360,8	443	437	-6
2004	366,0	443	437	-6
2005	368,9	442	440	-2
2006	371,7	442	434	-8
2007	371,6	438	436	-2
2008	369,7	436	434	-2
2009	369,9	436	433	-3
2010	372,1	438	436	-2
2011	375,9	443	420	-23
2012	361,0	425	420	-5
2013	362,1	424	417	-7
2014	361,4	422	421	-1
2015	371,2	431	424	-7
2016	377,0	434	430	-4
2017	378,6	434	431	-3
2018	386,5	440	433	-7
2019	386,8	439	426	-13
2020	382,3	431	425	-6
2021	382,8	431	421	-10

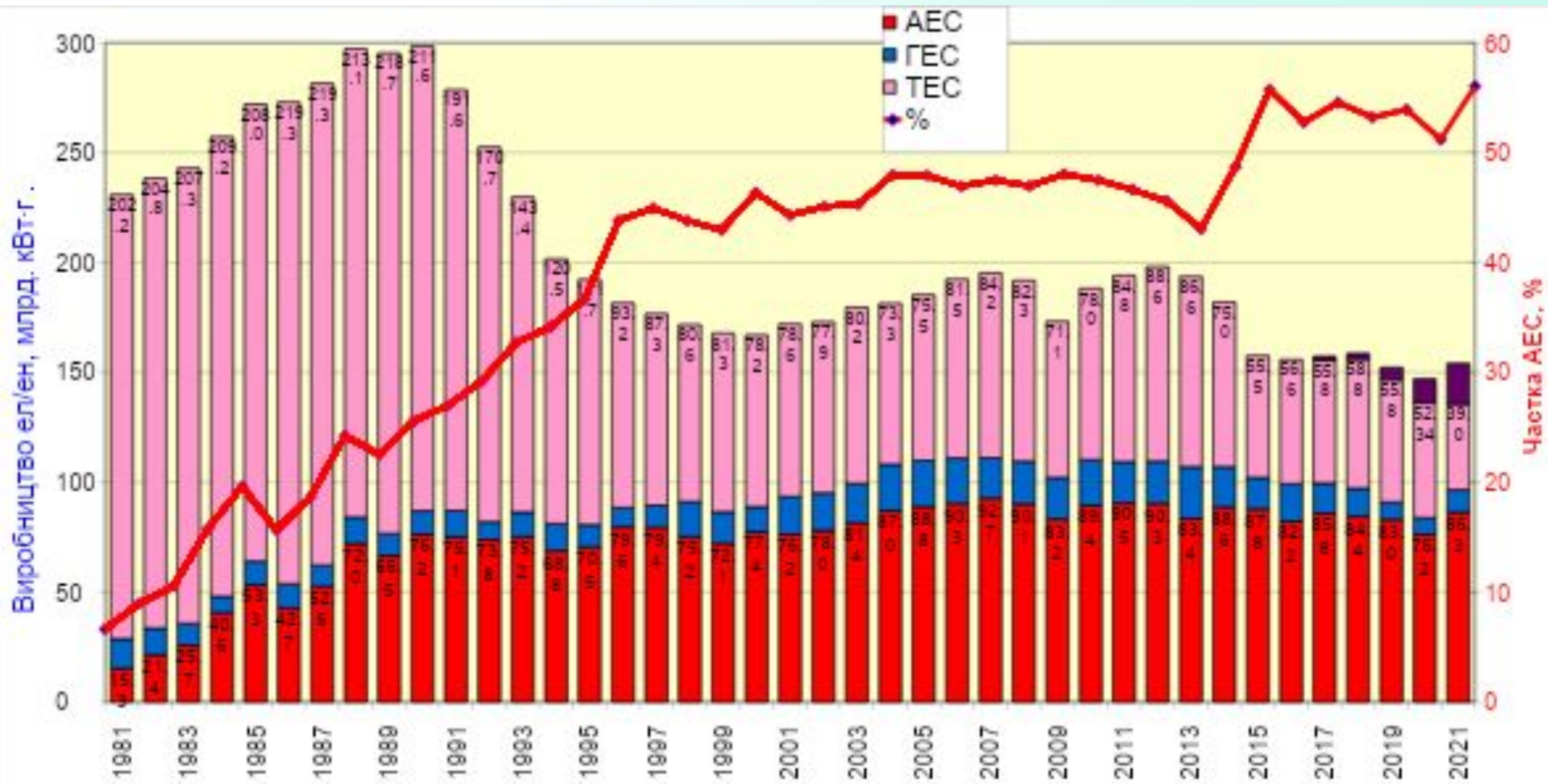


# Вік енергоблоків станом на 01.01.2023



В Україні **80%** ВВЕР вже відпрацювало 30-ти річний проектний термін експлуатації  
У світі з 442 е/б (на 01.01.2022), 300 е/б - **68 %** перетнули 30-ти річний термін експлуатації

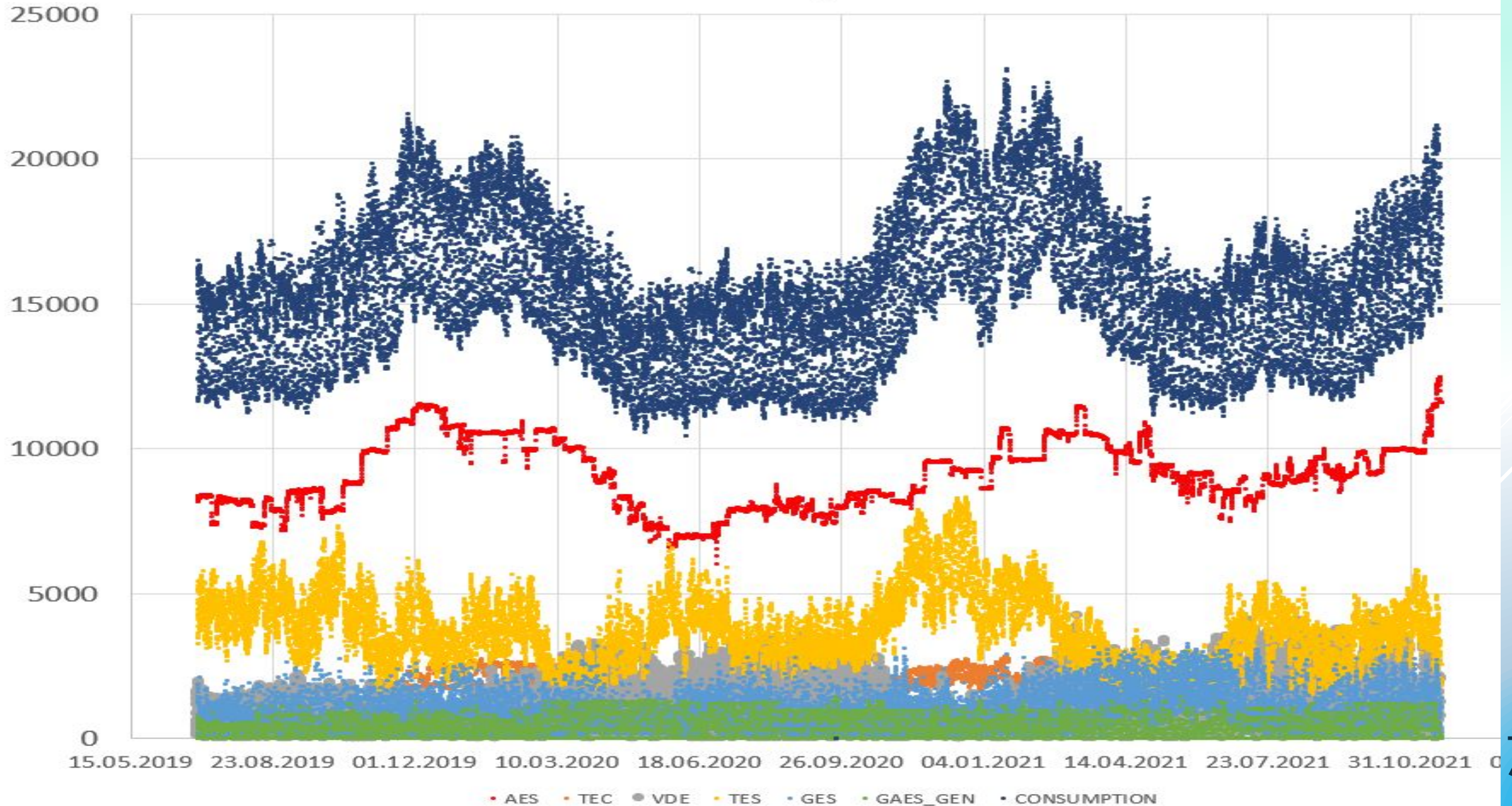
США – 42 р., Франція – 37 р., Україна – 34 р., **СВІТ – 31 р.**, П. Корея – 23 р., Китай – 9 р.



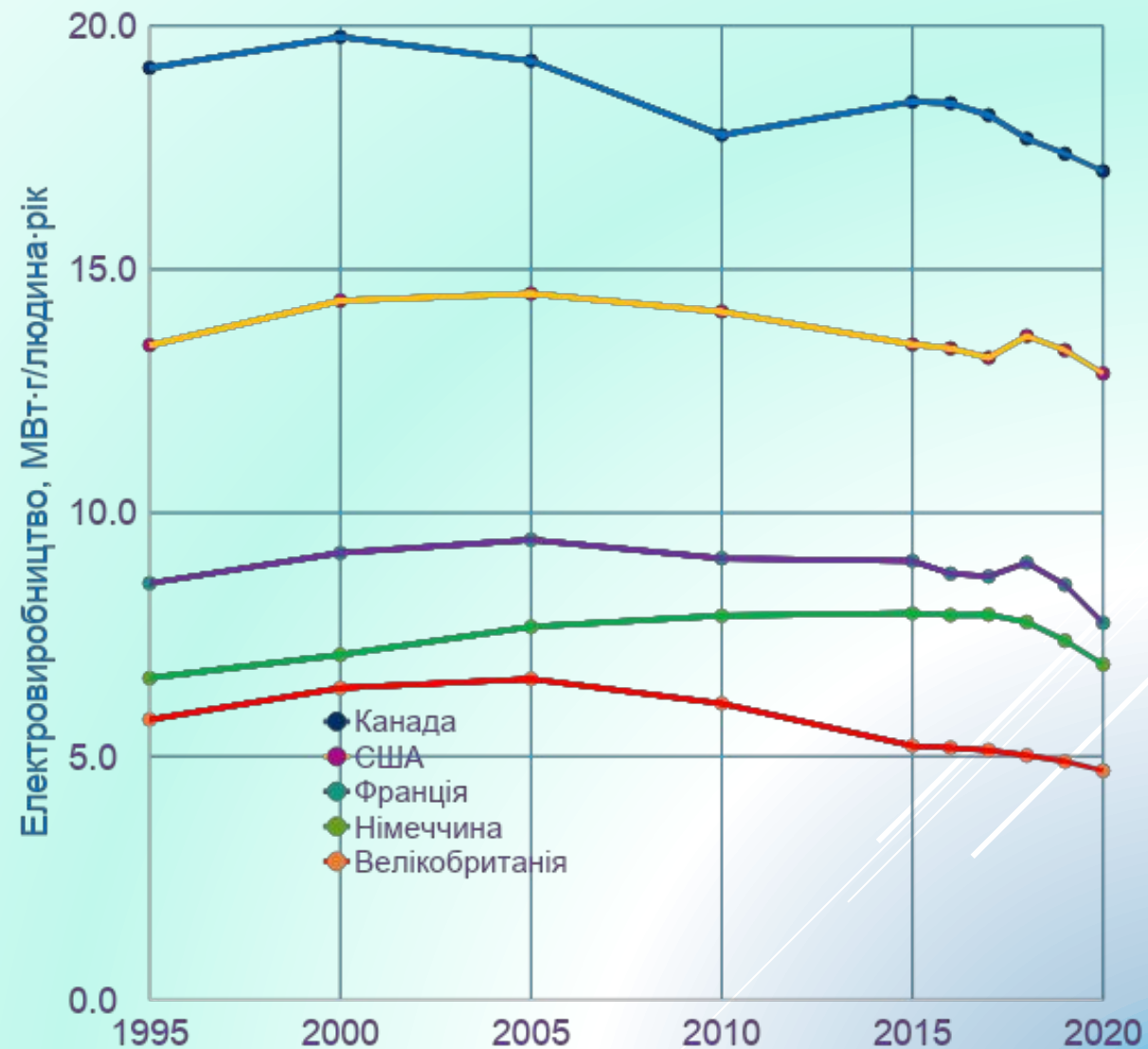
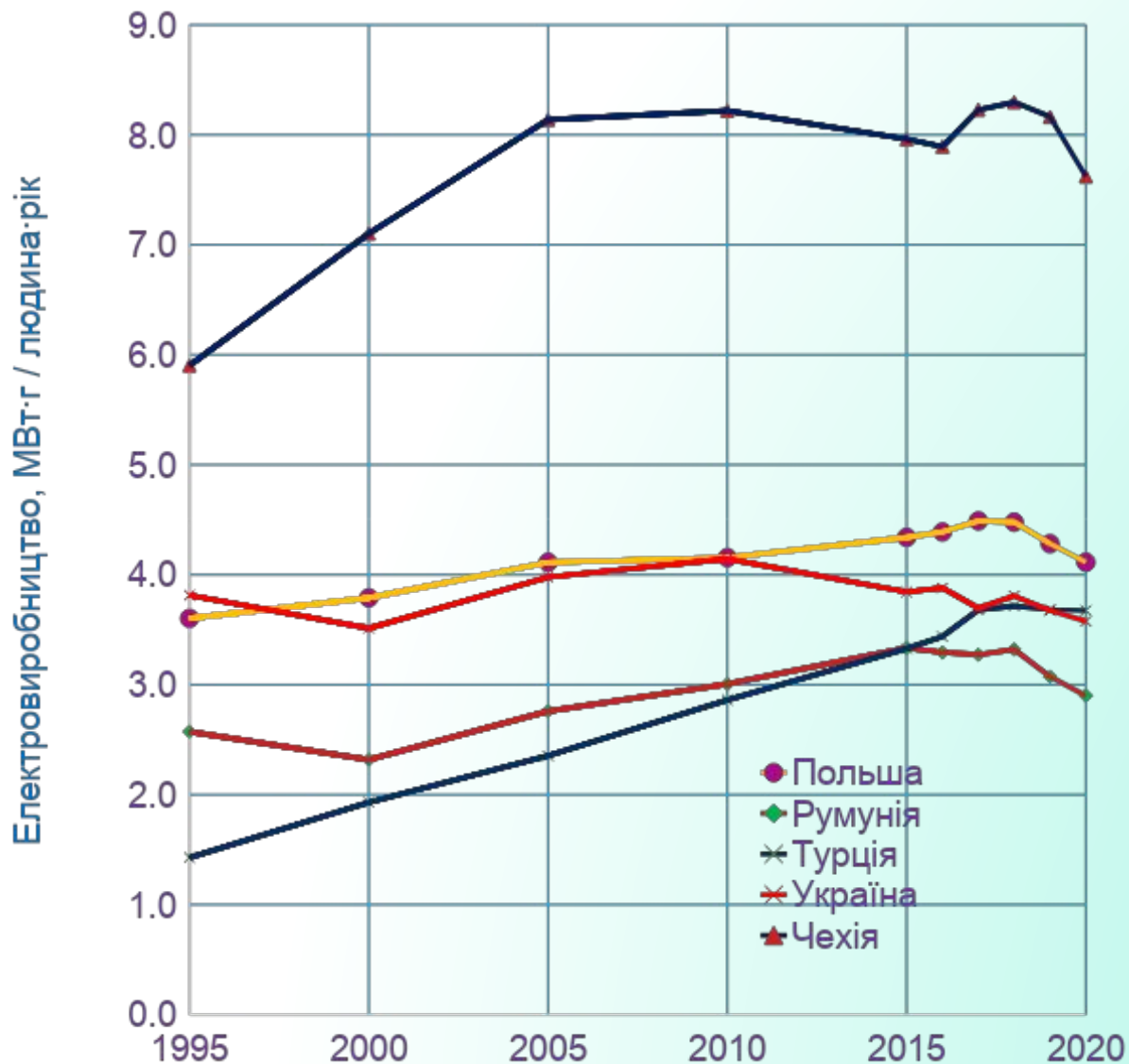
Виробництво ел/ен в Україні, млрд. кВт·г .



# Динаміка виробництва ел/ен в Україні, (потужність, МВт )



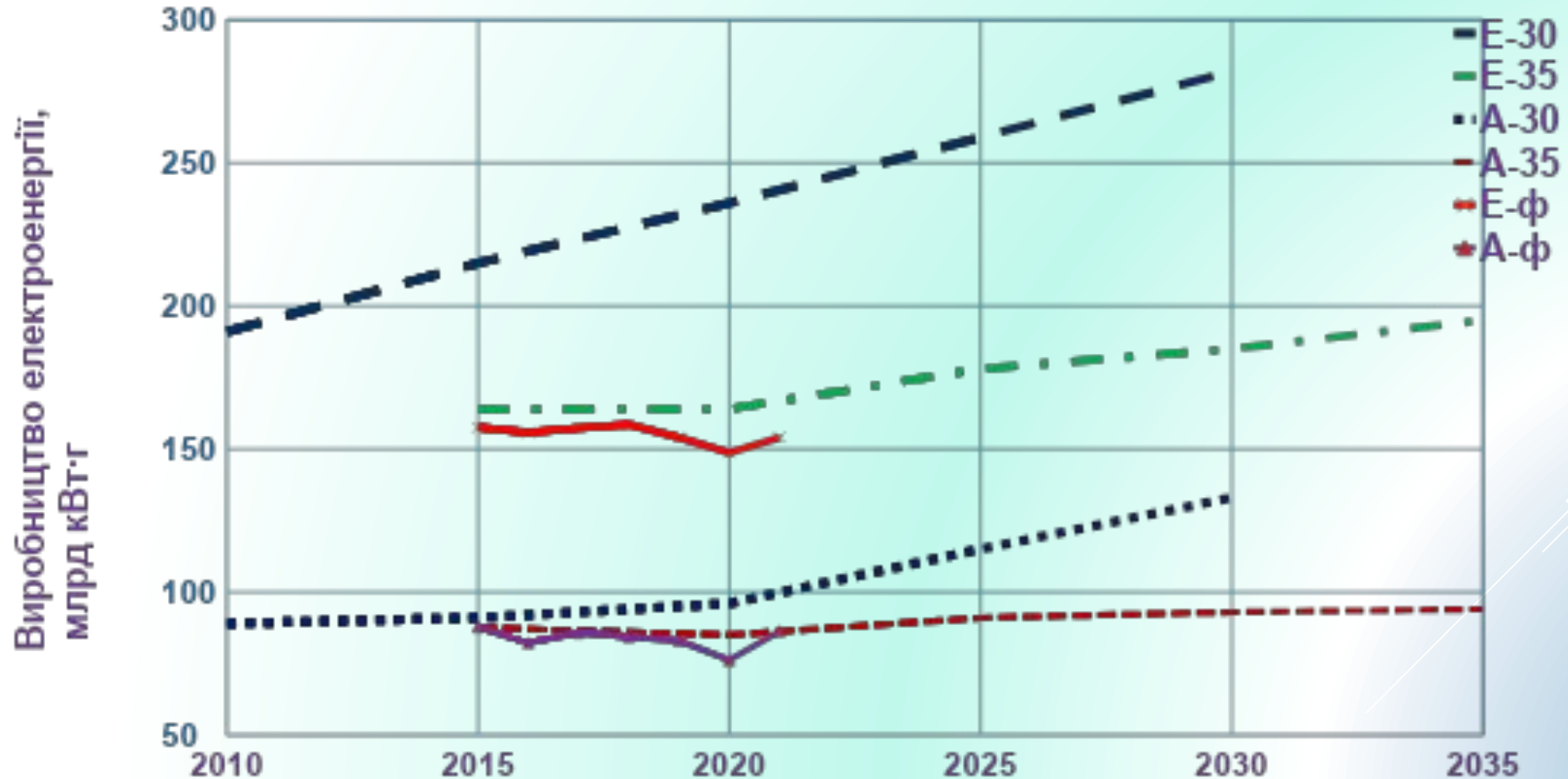
## 2. Прогнозування споживання електроенергії





## 2. Прогнозування споживання електроенергії

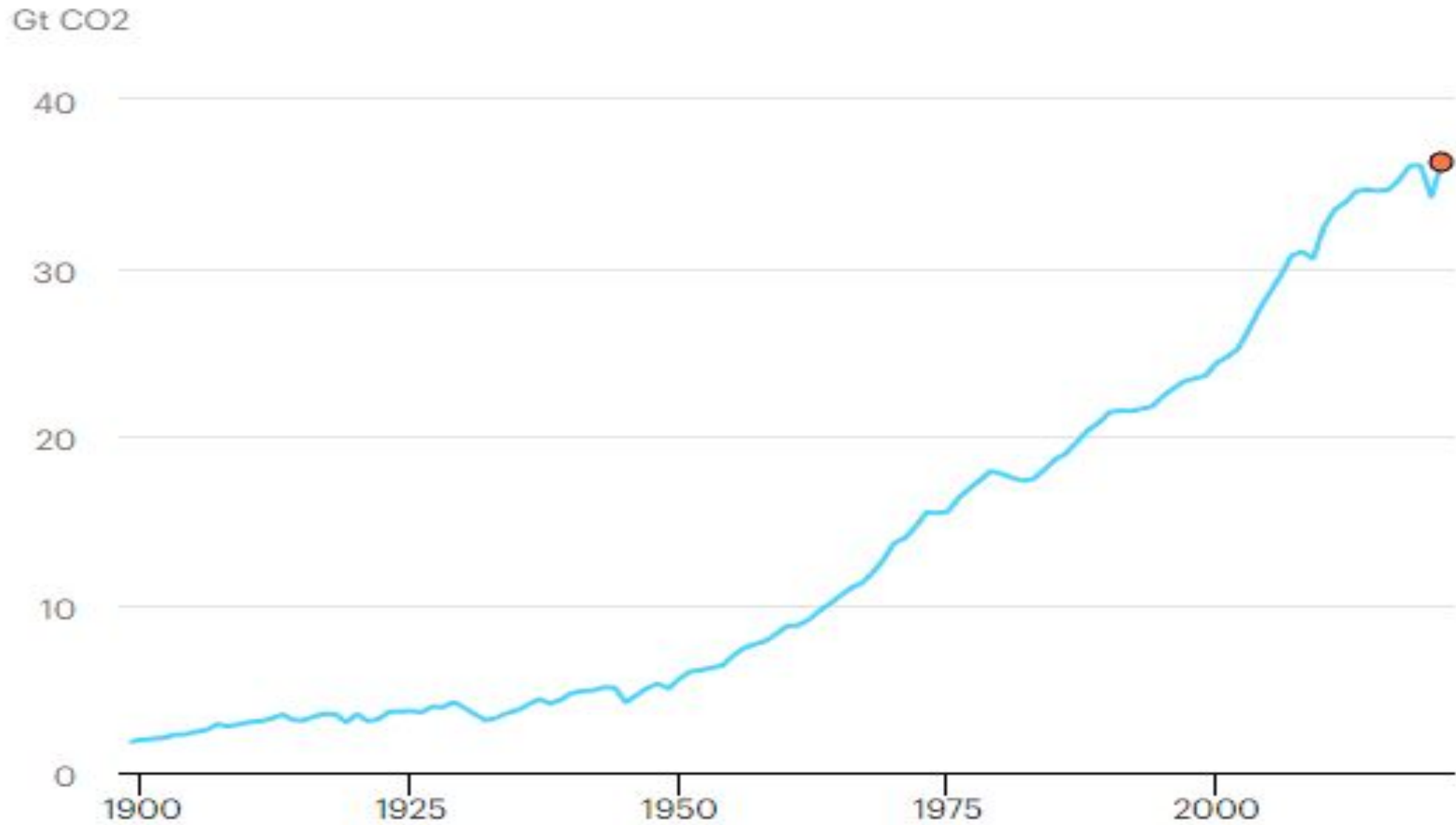
одним зі шляхів збереження досягнутого рівня виробництва є оновлення парку енергоблоків  
обґрунтування графіку введення нових енергоблоків і їх загальної кількості на найближчі роки.



# CO<sub>2</sub> emissions

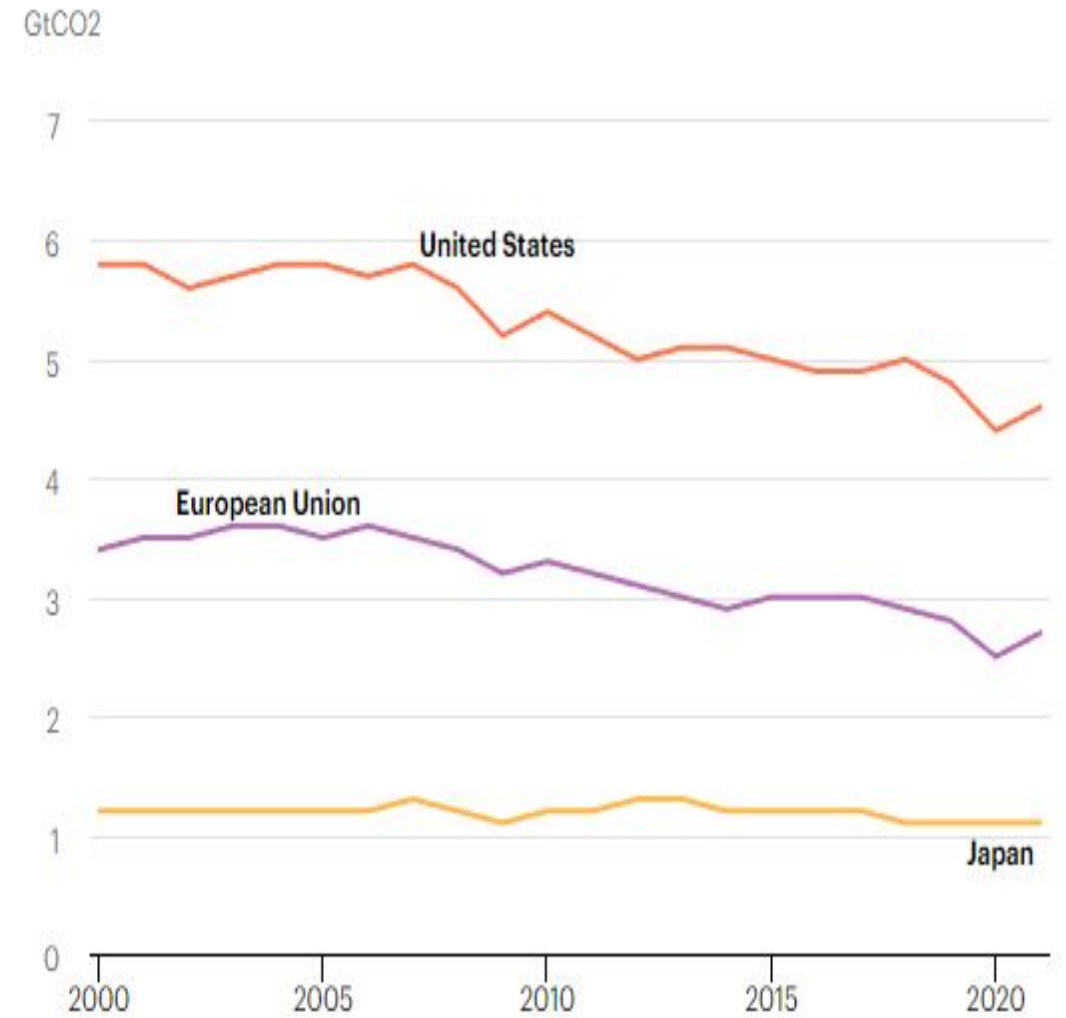
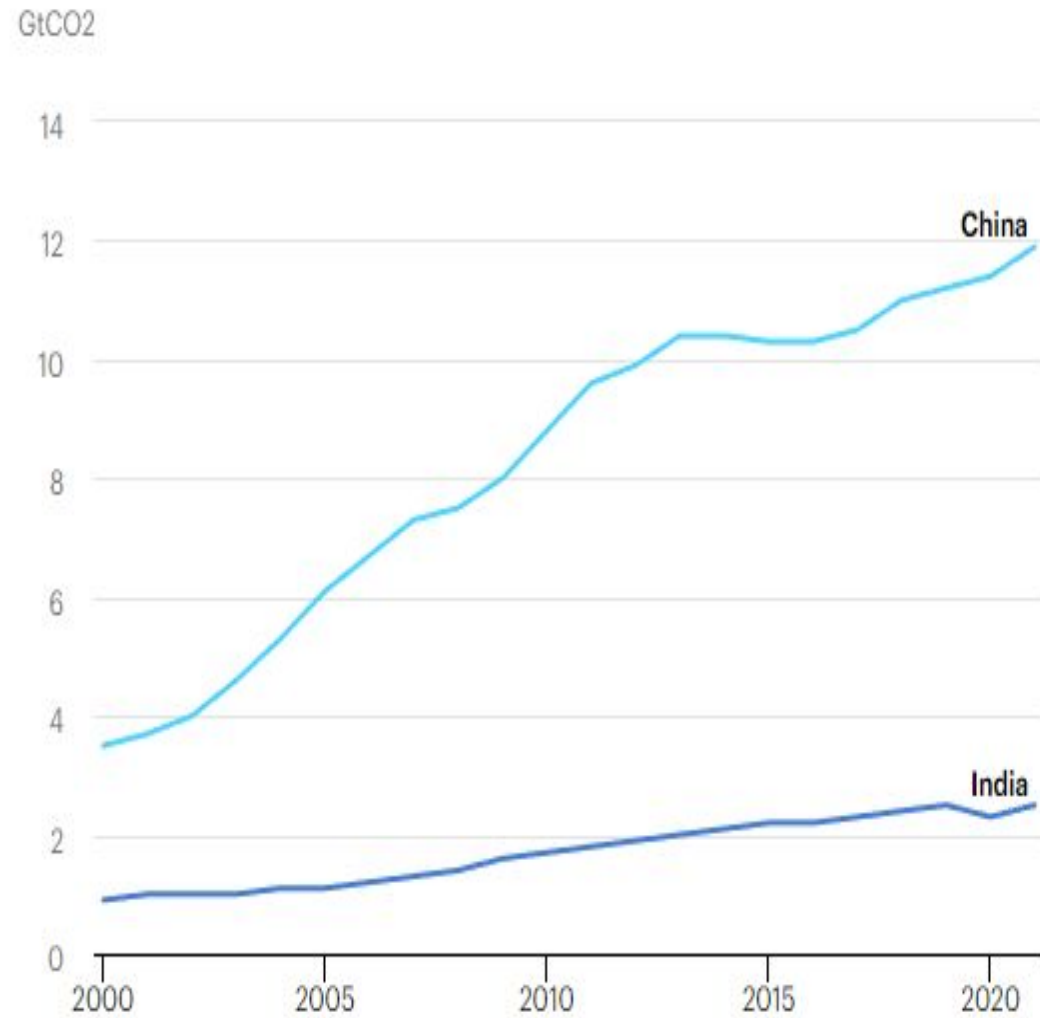


# CO<sub>2</sub> emissions



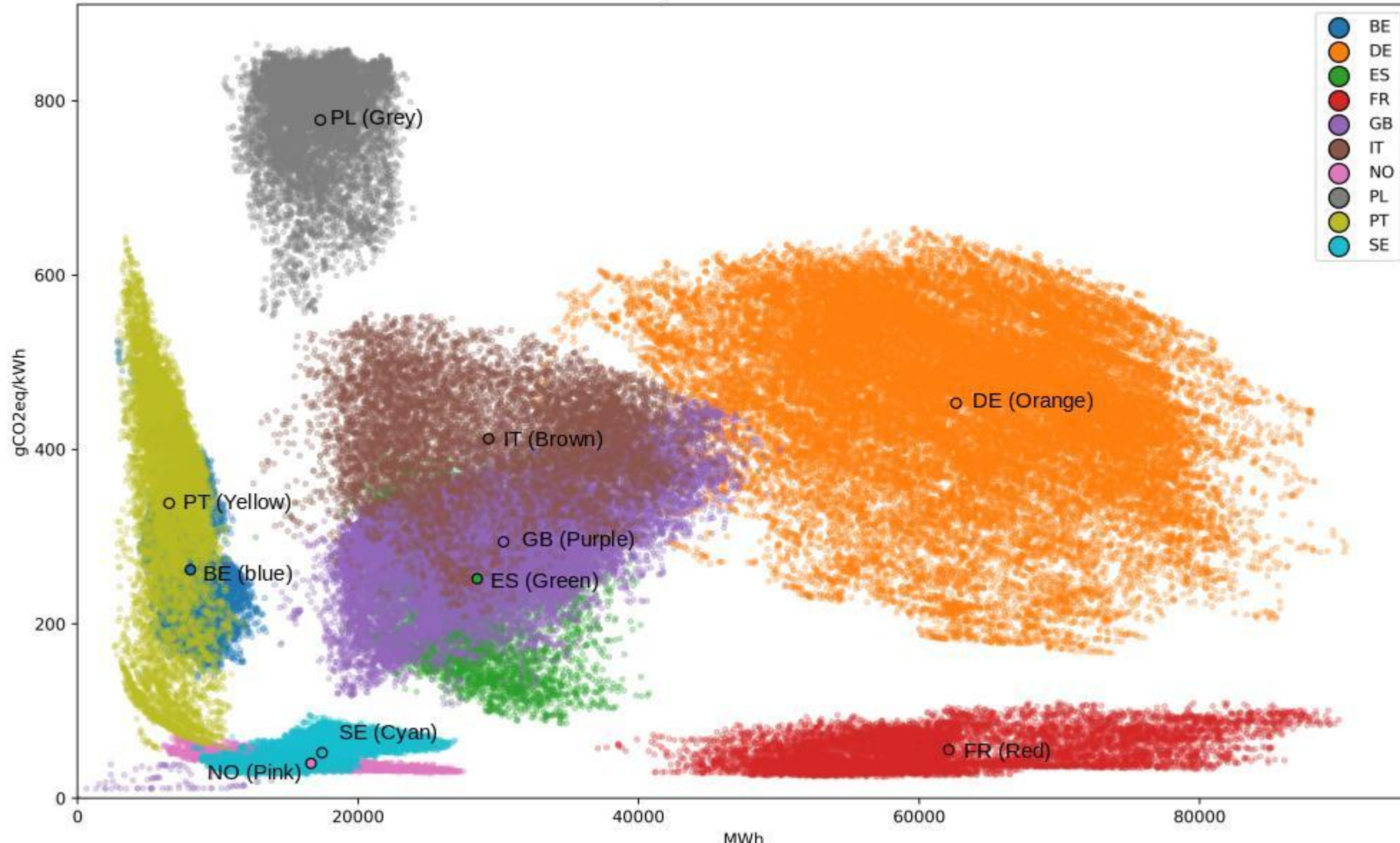


# CO<sub>2</sub> emissions

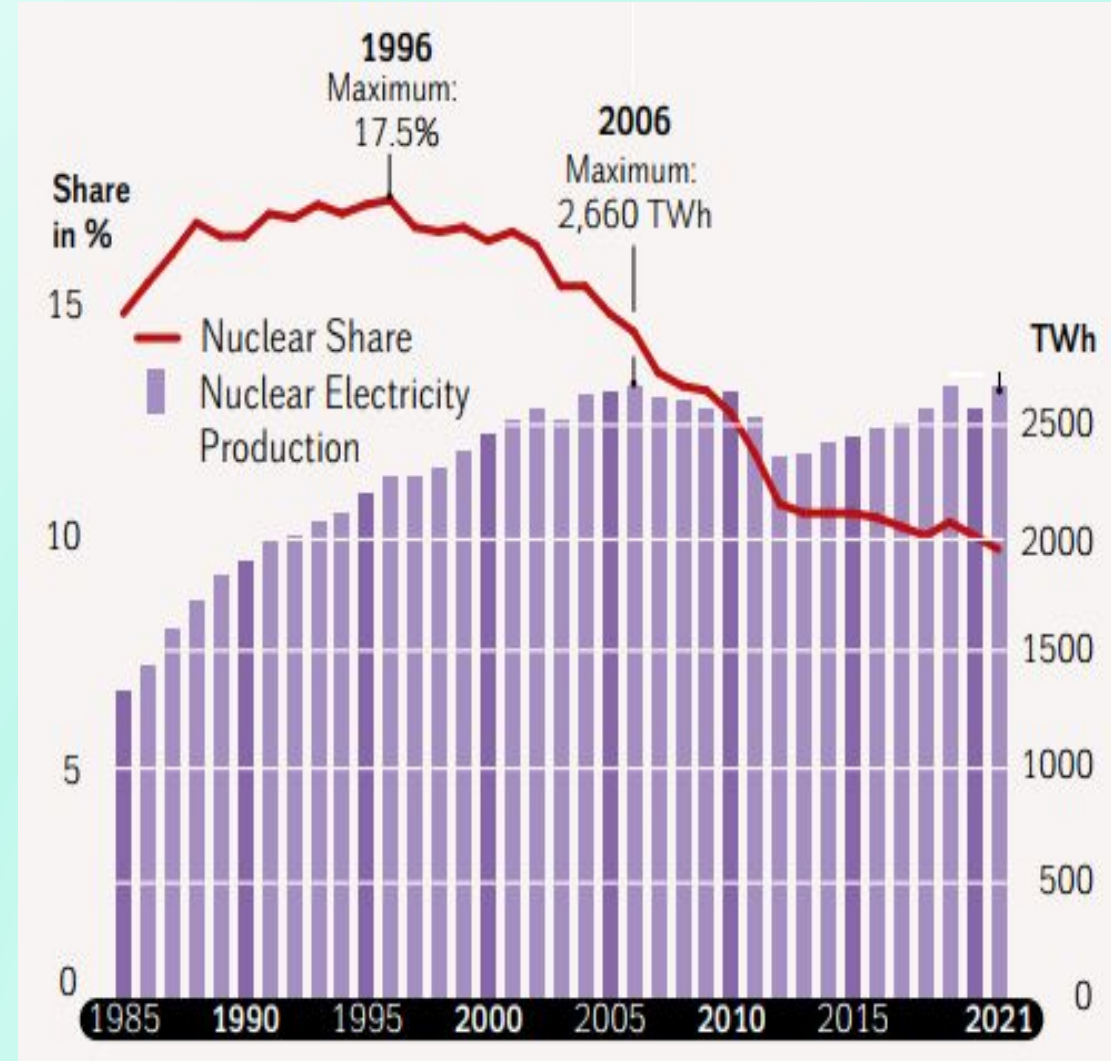
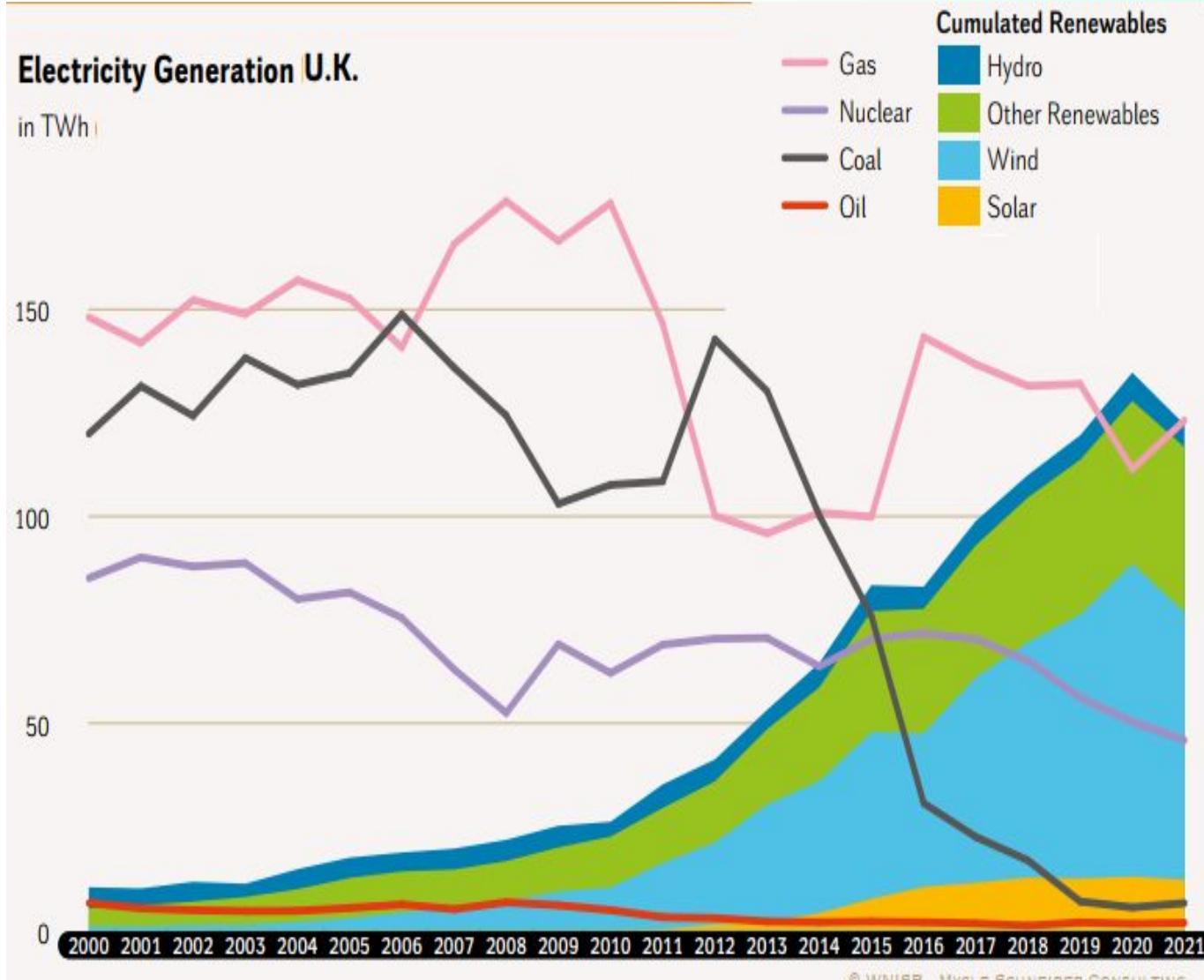


# CO<sub>2</sub> emissions

Relative emission compared to power generation  
Source: ENTSO-E, IPCC 2018  
From: 01-Jan-2018 to: 31-Dec-2018

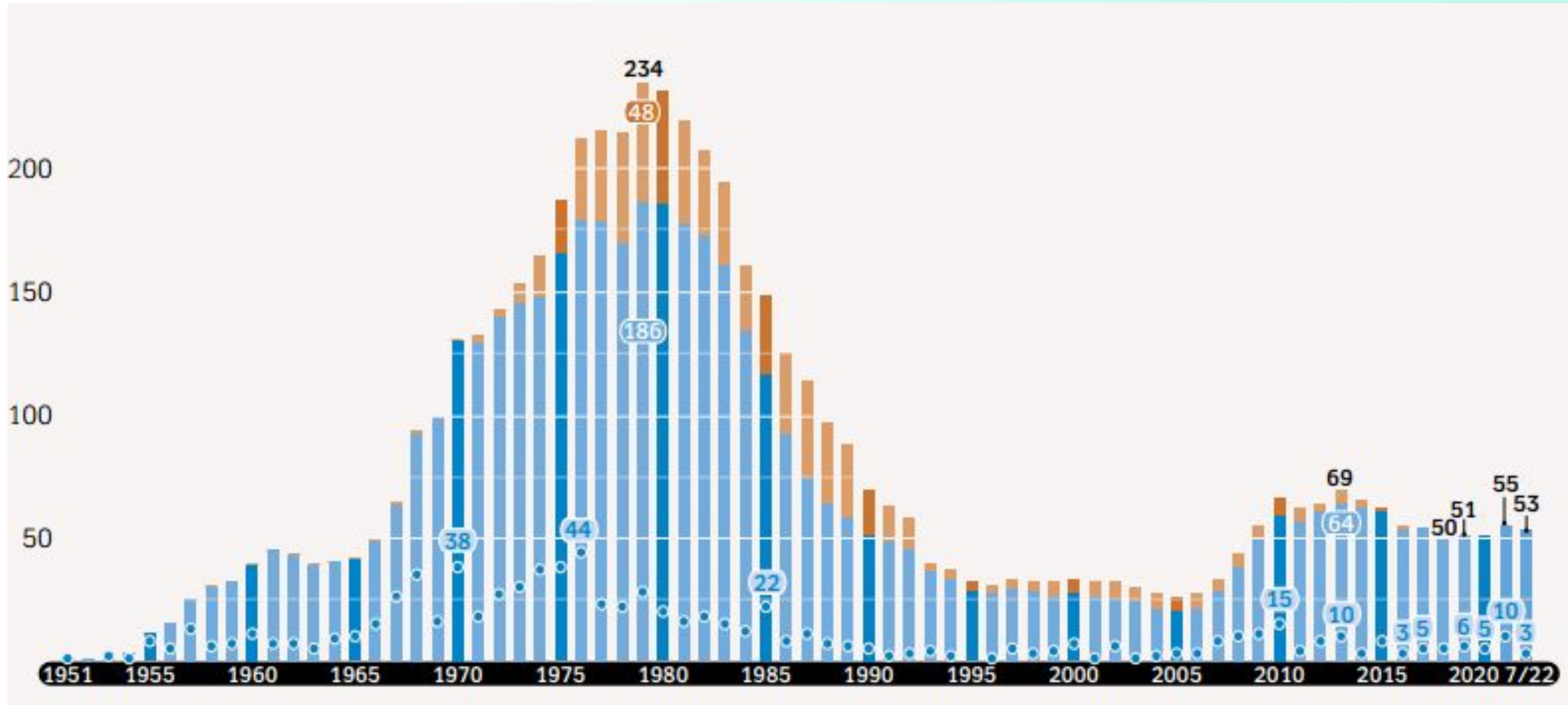


### 3. Світові тенденції в ядерній енергетиці





### 3. Світові тенденції в ядерній енергетиці

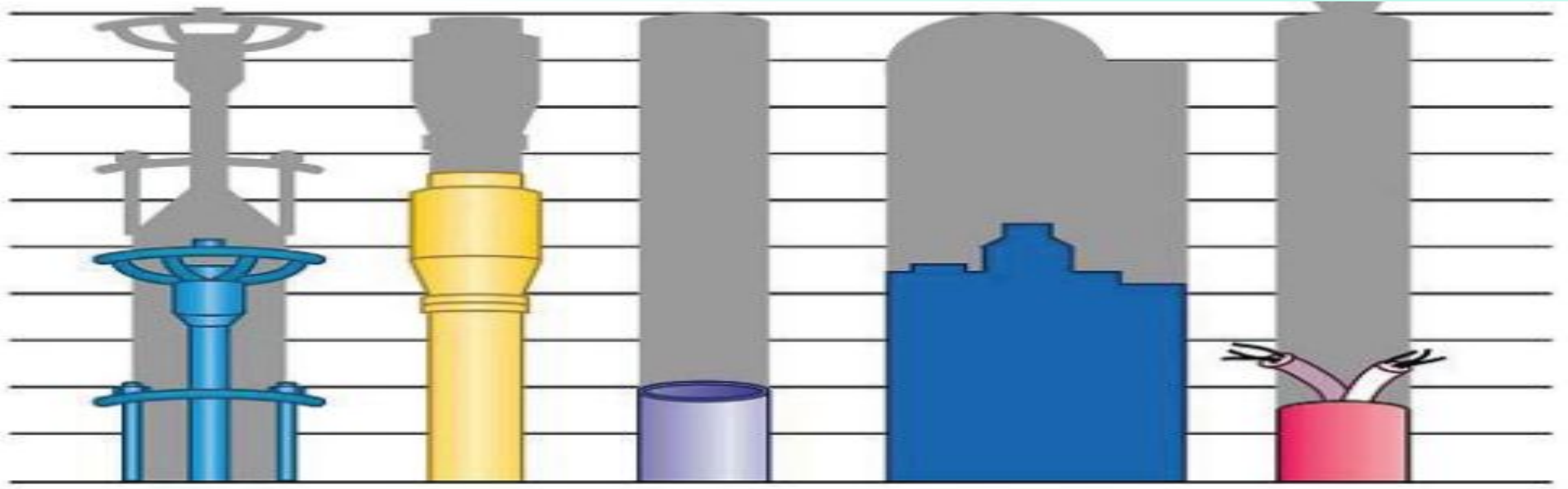


## 4. Сучасні реакторні установки покоління III+

**AP1000**

**EPR-1750**

**ВВЭР-1200**



на 50 %  
менше  
клапанів,  
пов'язаних із  
системами  
безпеки

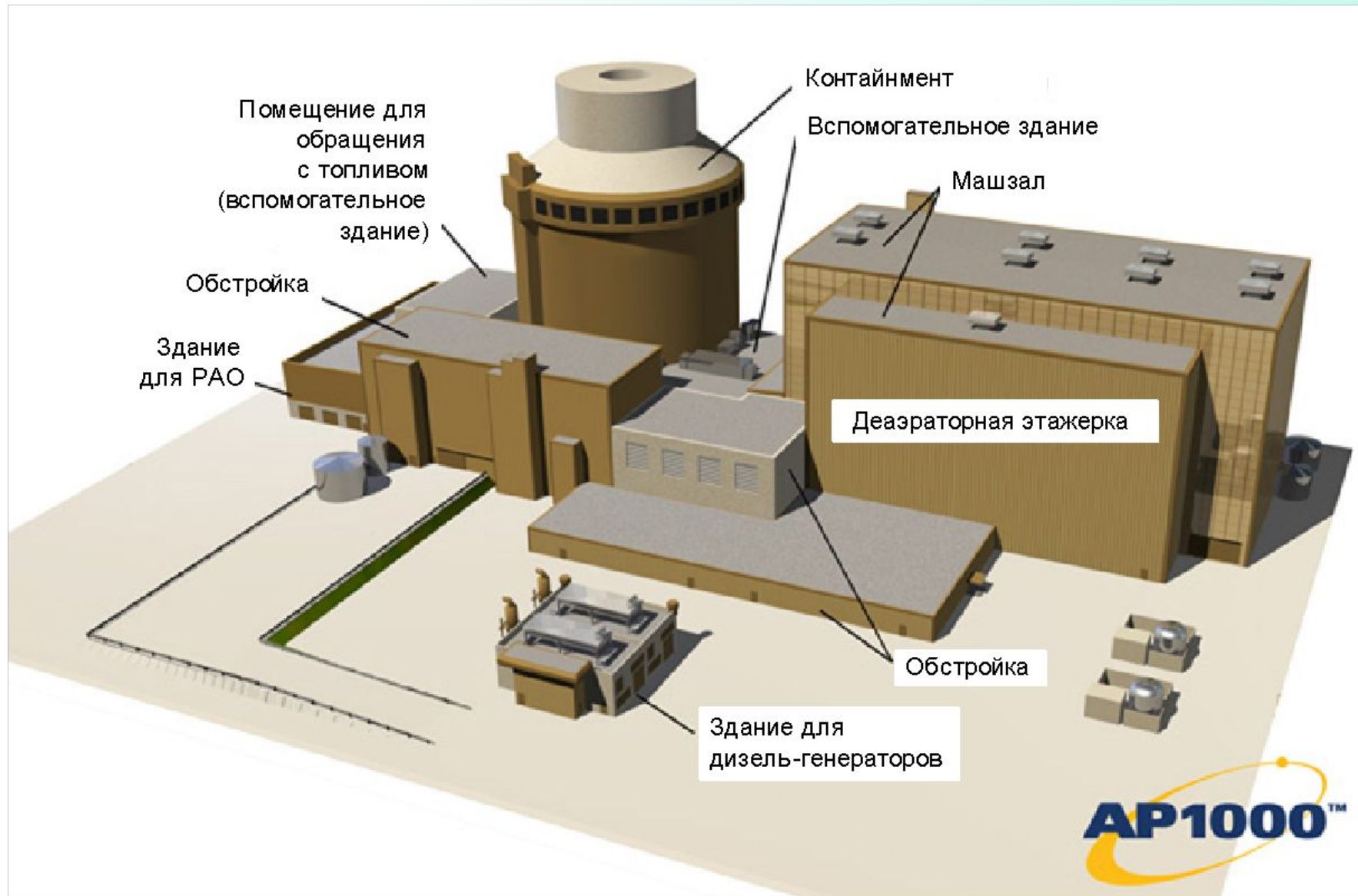
на 35%  
менше  
насосів;

на 80 % менше  
трубопроводів,  
пов'язаних із  
системами  
безпеки

на 45%  
менший  
будівельний  
об'єм

на 85 %  
менше  
керуючих  
кабелів

# Компонування майданчика АЕС з реактором AP1000



**Пасивна система охолодження АкЗ**

**Утримання розплаву АкЗ усередині КР**



# 5. Інноваційні реакторні установки Generation IV

реактор на швидких нейтронах із газовим охолодженням

Gas-cooled fast reactor (GFR)

реактор на швидких нейтронах свинцевий

Lead-cooled fast reactor (LFR)

реактор на швидких нейтронах натрієвий

Sodium-cooled fast reactor (SFR)

Рідкосольовий реактор

Molten salt reactor (MSR)

Реактор із надкритичними параметрами води

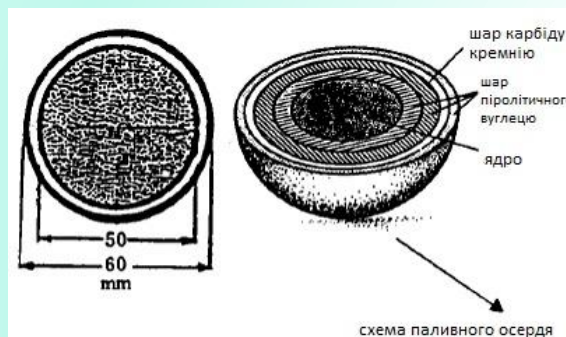
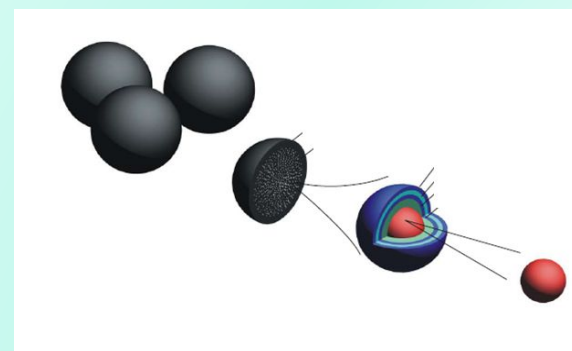
Supercritical water reactor (SCWR)

Високотемпературний реактор

Very-high-temperature reactor (VHTR)



Тепловая мощность, МВт	700
Количество петель	4
Теплоноситель первого контура	свинец
Максимальное (гидростатическое) давление теплоносителя в первом контуре, МПа	1,17
Средняя температура СТ на входе/выходе из активной зоны, °С	420/535
Число ТВС в активной зоне	169
Загрузка топлива, т	20,6
Электрическая мощность ЭБ, МВт	300
Средняя температура рабочего тела на входе/выходе из парогенератора, °С	340/505
Давление на выходе из парогенератора, МПа	17
Паропроизводительность, т/ч	1500
КПД, %	43,5

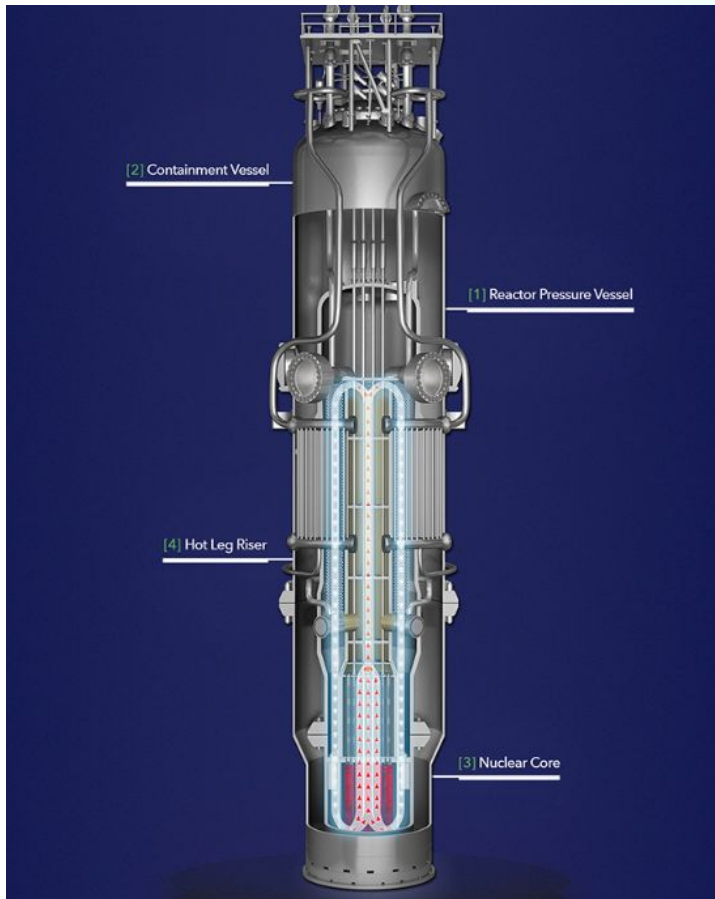


Схематичне зображення кулястого тепловидільного елемента

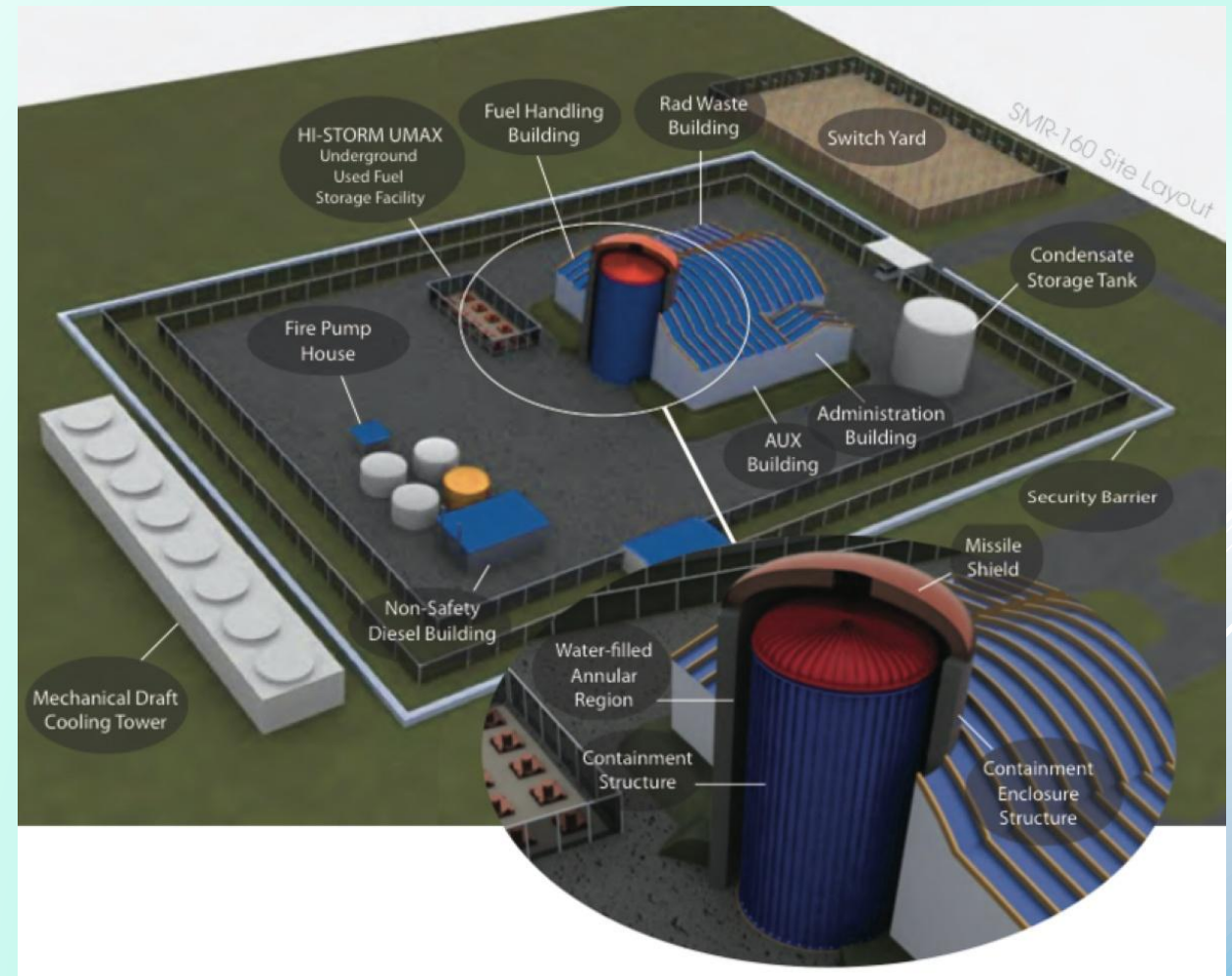


## 6. Проекти малих модульних реакторів

### NuScale

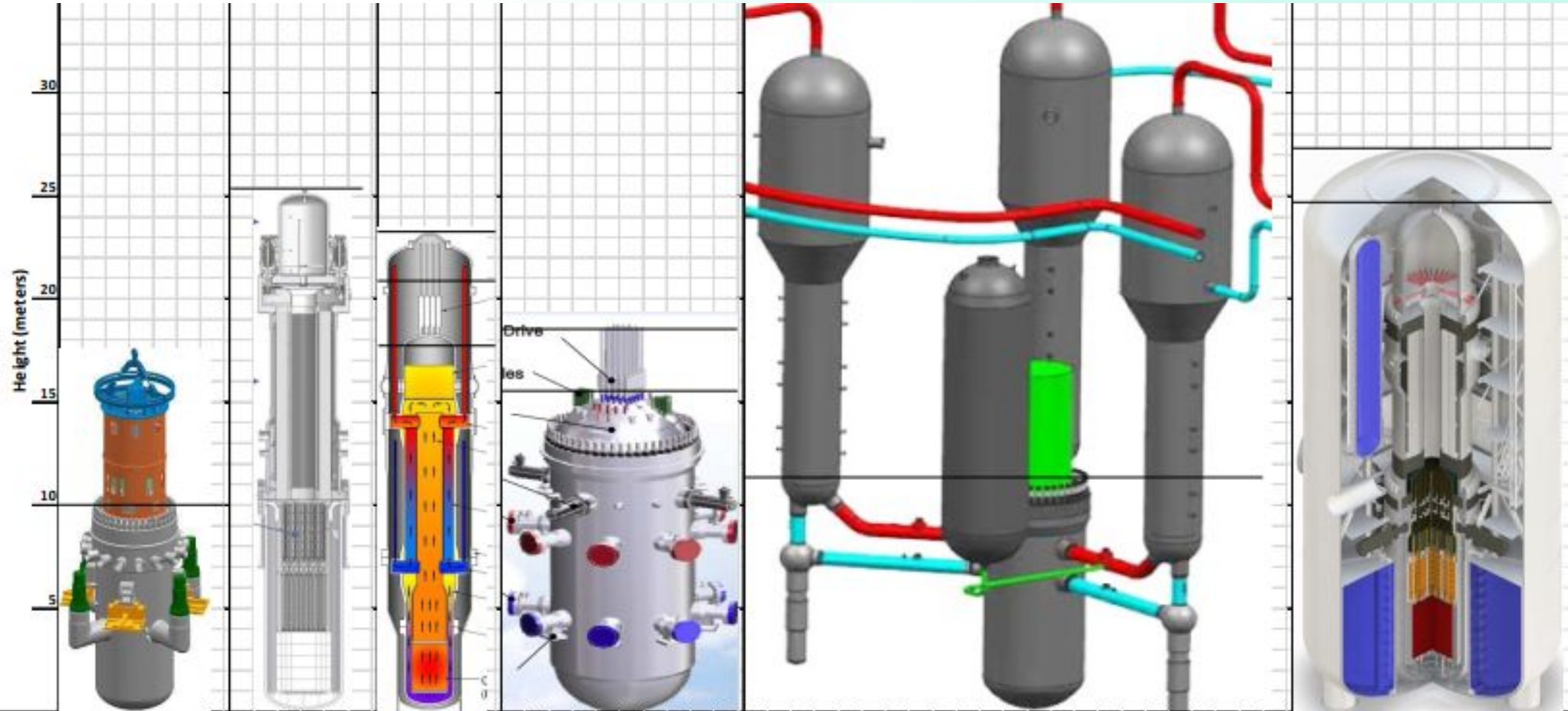


### SMR-160





# 6. Проекти малих модульних реакторів



Reactor	ACP100	Generation mPower	NuScale	SMART	UK SMR	Westinghouse SMR
Vendor	CNNC (China)	B&W (US)	NuScale Power (US)	KAERI (Republic of Korea)	Rolls-Royce (UK)	Westinghouse Electric Co (US)
Unit Power	100 MWe (310 MWth)	195 MWe (575 MWth)	45 MWe (160 MWth)	100 MWe (330 MWth)	400-450 Mwe (1200-1350 MWth)	>225 MWe (800 MWth)
Height						
RPV	10 m + CRDM	27.5 m	20.9 m	15.5 m + CRDM = 18.5 m	11.3 m + CRDM	24.7 m
Containment			23.2 m			27.1 m
Diameter						
RPV	3.2 m (inner diam)	4.1 m	2.8 m	6.5 m	4.5 m	3.7 m
Containment			4.6 m			9.7 m
Weight (RPV only)		688 tonnes	~ 635 tonnes			

APPLICATION OF MULTI-CRITERIA  
DECISION ANALYSIS METHODS TO  
COMPARATIVE EVALUATION OF  
NUCLEAR ENERGY SYSTEM OPTIONS

INPRO Collaborative Project “Key Indicators  
for Innovative Nuclear Energy Systems”  
KIND

EXECUTIVE SUMMARY



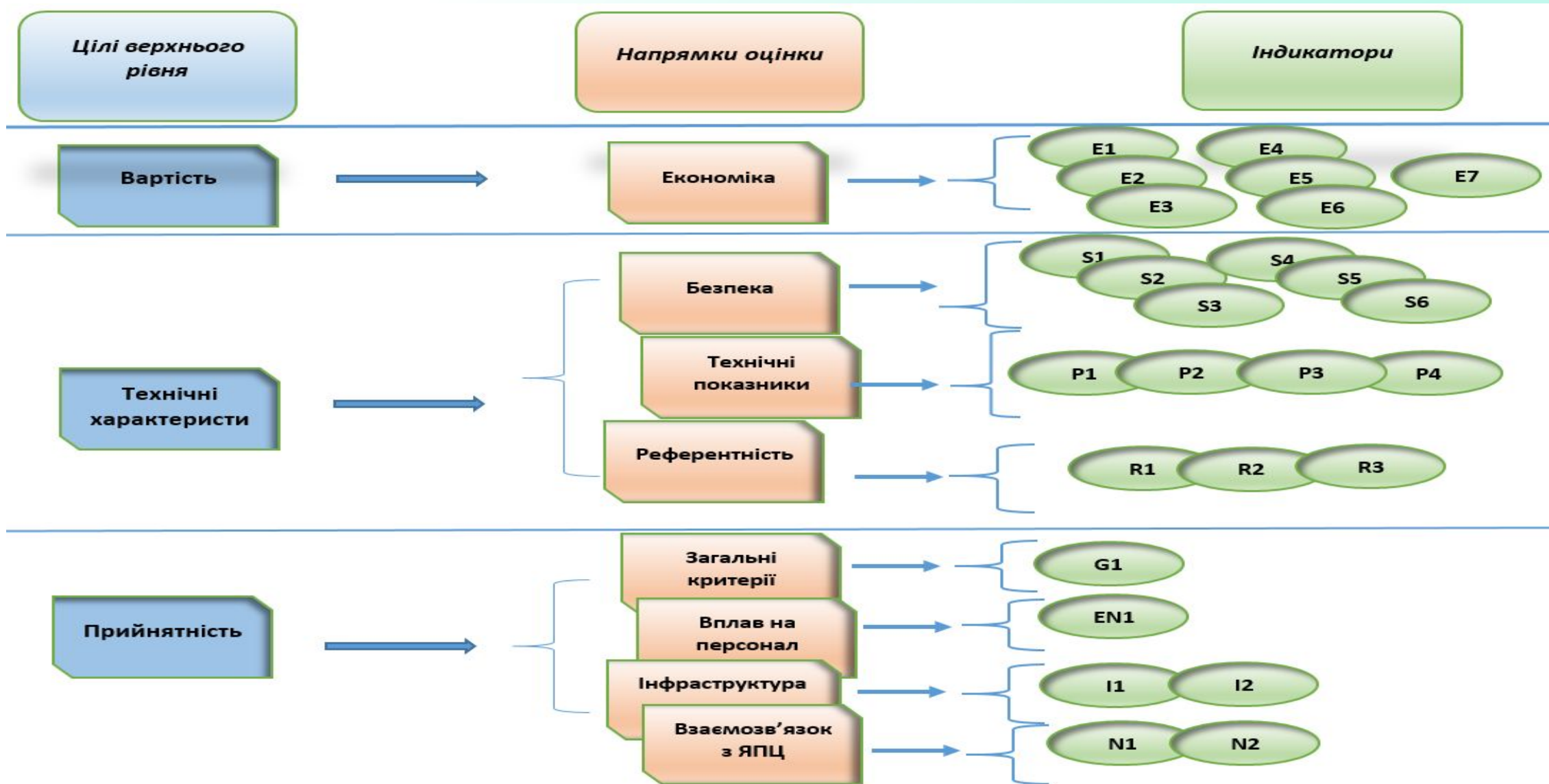
INPRO  
International Project on  
Innovative Nuclear Reactors  
and Fuel Cycles

## 7. Науково-технічні підходи щодо оптимального вибору реакторних технологій

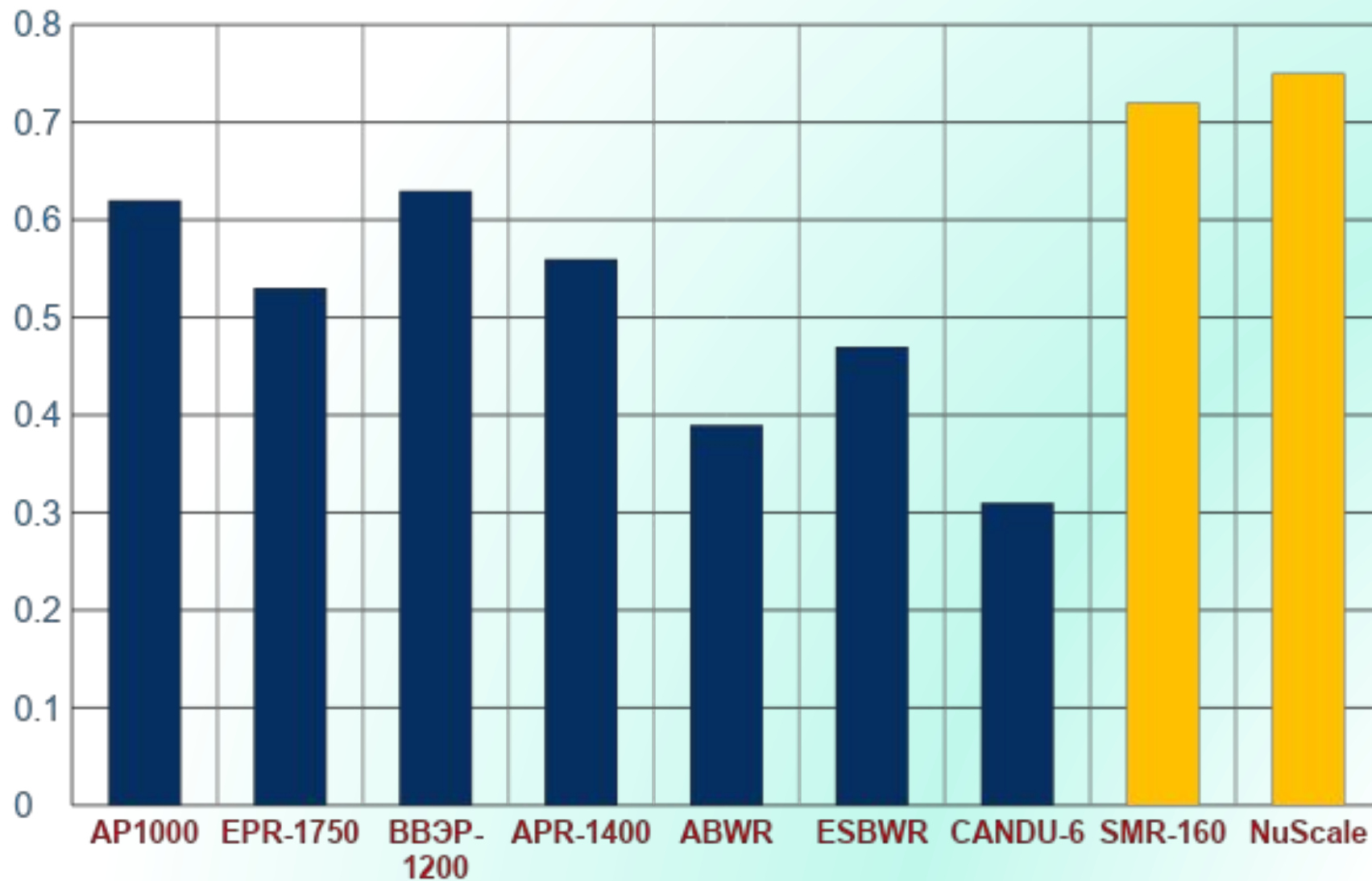
- Постановка проблеми та визначення мети;
- Формулювання альтернатив;
- Ідентифікація Ключових Індикаторів;
- Оцінка показників, включаючи невизначеності, формування таблиці ефективності;
- Побудова дерева цілей і призначення ваги, включаючи невизначеності;
- Альтернативне визначення рейтингу на основі обраного методу;
- Аналіз чутливості та невизначеності;
- Складання висновків і рекомендацій.



## Взаємозв'язок цілей верхнього рівня, областей оцінки та індикаторів



Найменування цілей верхнього рівня	Найменування напрямів оцінки	Найменування критеріїв (індикаторів)	Аббр. інди-каторів
Вартість	Економіка	Вартість будівництва, в тому числі основних об'єктів на проммайданчику, USD/кВт	<b>E1</b>
		Можливість розміщення заміщуючих потужностей на майданчиках діючих АЕС	<b>E2</b>
		Приведена тривалість будівництва на майданчику, міс/МВт	<b>E3</b>
		Використання принципу стандартизації будівництва	<b>E4</b>
		Використання принципу модульного будівництва	<b>E5</b>
		Об'єм участі національної промисловості і національних організацій, %	<b>E6</b>
		Питоме споживання природного урану, кг/кВт·доба	<b>E7</b>



## Результати ранжування

**УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ  
ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РАДІАЦІЙНО-ЯДЕРНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ**

## 8. Техніко-економічні показники сучасних РУ

АЕС	SANMEN (AP1000)		HAIYANG (AP1000)		TAISHAN (EPR-1750)	
	1	2	1	2	1	2
2019	88,7	8,9	95,9	100,7	82,2	36,8
2020	86,4	86,7	88,8	91,9	63,1	85,6
2021	92,5	90,2	92,6	94,1	52,4	74,8

АЕС	НВ-В (ВВЕР-1200)		ЛЕН-град (ВВЕР-1200)		ВАКААН (APR-1400)
	1	2	1	2	1
2019	73,6	36,5	76,4	0,0	0,0
2020	77,9	77,9	80,6	7,1	13,3
2021	77,1	75,3	92,1	89,5	75,8



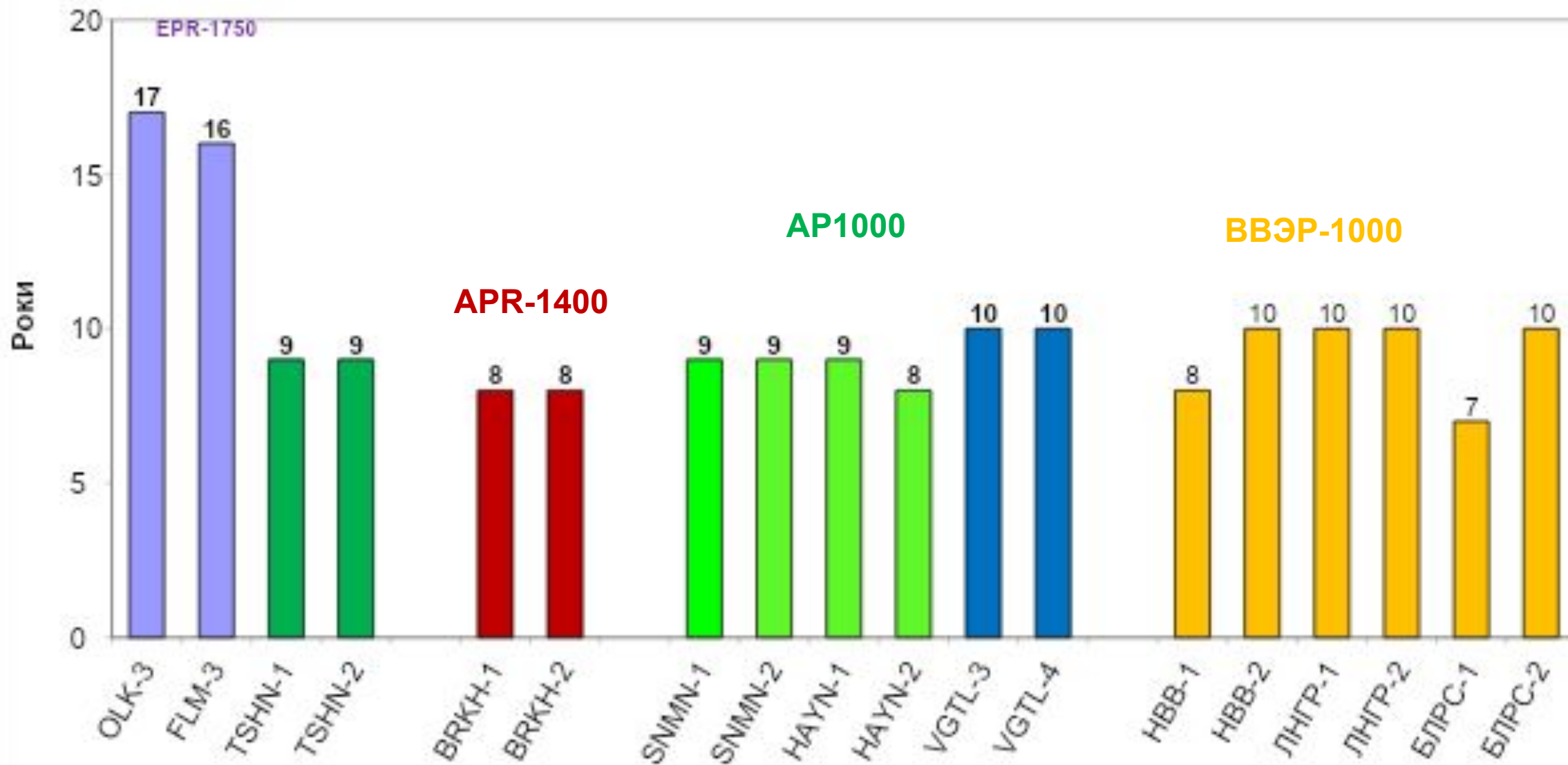
# Проблеми AP1000



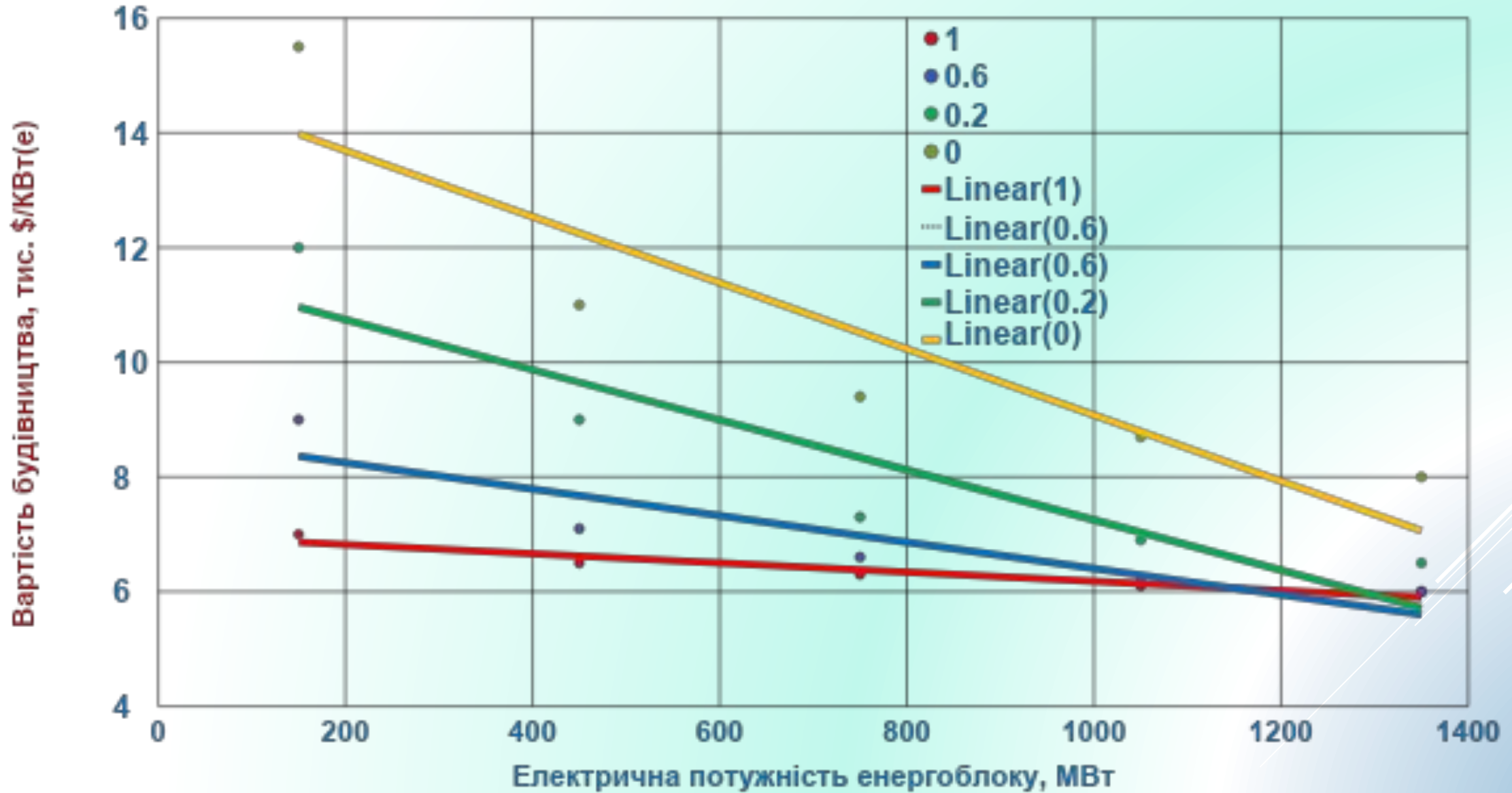
1. пошкодження різних елементів ГЦН, у тому числі і під час промислової експлуатації на Sanmen- 2 у 2019 р. (див. Слайд №20).
2. реальні строки будівництва: в Китаї - 8-9 років, у США вже більше 9-ти років .
3. вартість будівництва AP1000 - загальна вартість будівництва 2-ох енергоблоків з AP1000 на АЕС Vogtle складає вже більше 30 млрд. \$.
4. логістичні питання щодо доставки на майданчик АЕС великогабаритних конструкції і обладнання.

- А чи будуються енергоблоки з AP1000 в інших країнах на майданчиках АЕС?
- У 2016 р. на рівні керівництва США і Індії було зроблено заяву про наміри будівництва 6-ти AP1000 в Індії в штаті Андхра Прадеш, однак, до практичних кроків досі так і не перейшли.
- Наміри Польщі побудувати 6 реакторів AP1000 про яку було заявлено у 2020 р., 2023 р - 3 AP1000.
- У США було видано 14 ліцензій на будівництво AP1000: по 2 е/блока на АЕС Bellefonte, Levy Country, V.C. Summer, Vogtle, W.S. Lee, Turkey Point, Harris.
- Як відомо будівництво ведеться тільки на АЕС Vogtle, на V.C. Summer будівництво припинено у 2018 р.
- Таким чином, починаючи з 2013 р., нове будівництво е/блоків з AP1000 не починалося.
- Великобританія у 2018 р. на ТЕНДЕРІ обрала технологію EPR-1750 для АЕС HINKLEY POINT

## Терміни будівництва сучасних енергоблоків



# 9. Порівняння вартості реакторних технологій



# Вартість виробленої кВт·г

Тип РУ	PWR		SMR
Потужність ел., <b>МВт</b>	1000		100
З урахуванням кредиту, <b>\$/кВт</b>	7000		700
Виробництво ел/ен. за рік, <b>млрд.кВт·г</b>	7000		700
Погашення за 1 рік, вартість <b>\$/кВт·г</b>	1		1
Погашення за 10 років, вартість <b>\$/кВт·г</b>	0,1		0,1
Терміни повернення коштів, <b>років</b>	10		10
Терміни фактичні, <b>років</b>	20		14



# Вартість виробленої кВт·Г



PERIOD	COSTS (\$M)	START	END
Initial Development Period	\$ 13	Apr 2015	Dec 2020
Licensing Period Phase 1A (Development Work to PCE 3)	112	Jan 2021	Feb 2023
Licensing Period Phase 1B (Devel. Work to PCE 2/COLA Submit)	255	Mar 2023	Jan 2024
Licensing Period Phase 2 (NRC COLA review)	<u>2,302</u>	Feb 2024	Jul 2026
TOTAL DEVELOPMENT COSTS	\$2,682	Apr 2015	Jul 2026
Construction Period	<u>6,654</u>	Aug 2026	Dec 2030
TOTAL COST OF ACQUISITION AND CONSTRUCTION	<u>\$9,336</u>		

NuScale (6 x 77) = 462 МВт(е)

2020 – 58 \$/МВт·Г

2023 – **89** \$/МВт·Г

## NuScale Power Corp.

ADD TO WATCHLIST

CREATE SMR ALERT

OPEN  
\$ **8.60**  
▼ -0.12 -1.38%

Last Updated: Apr 24, 2023 at 3:11 p.m. EDT  
- Real time quote

PREVIOUS CLOSE

\$8.72

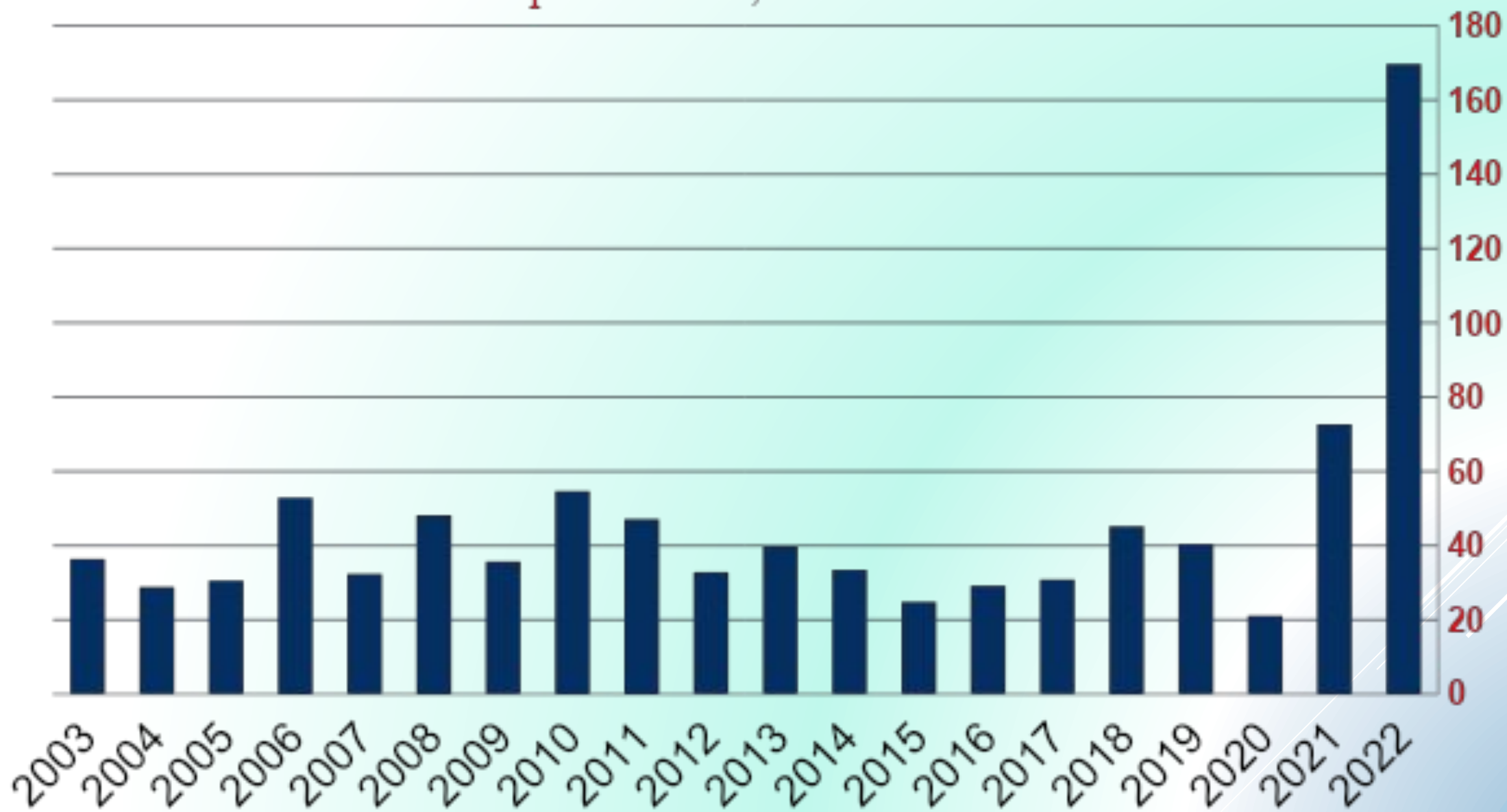
VOLUME: 219.56K

65 DAY AVG: 668.78K

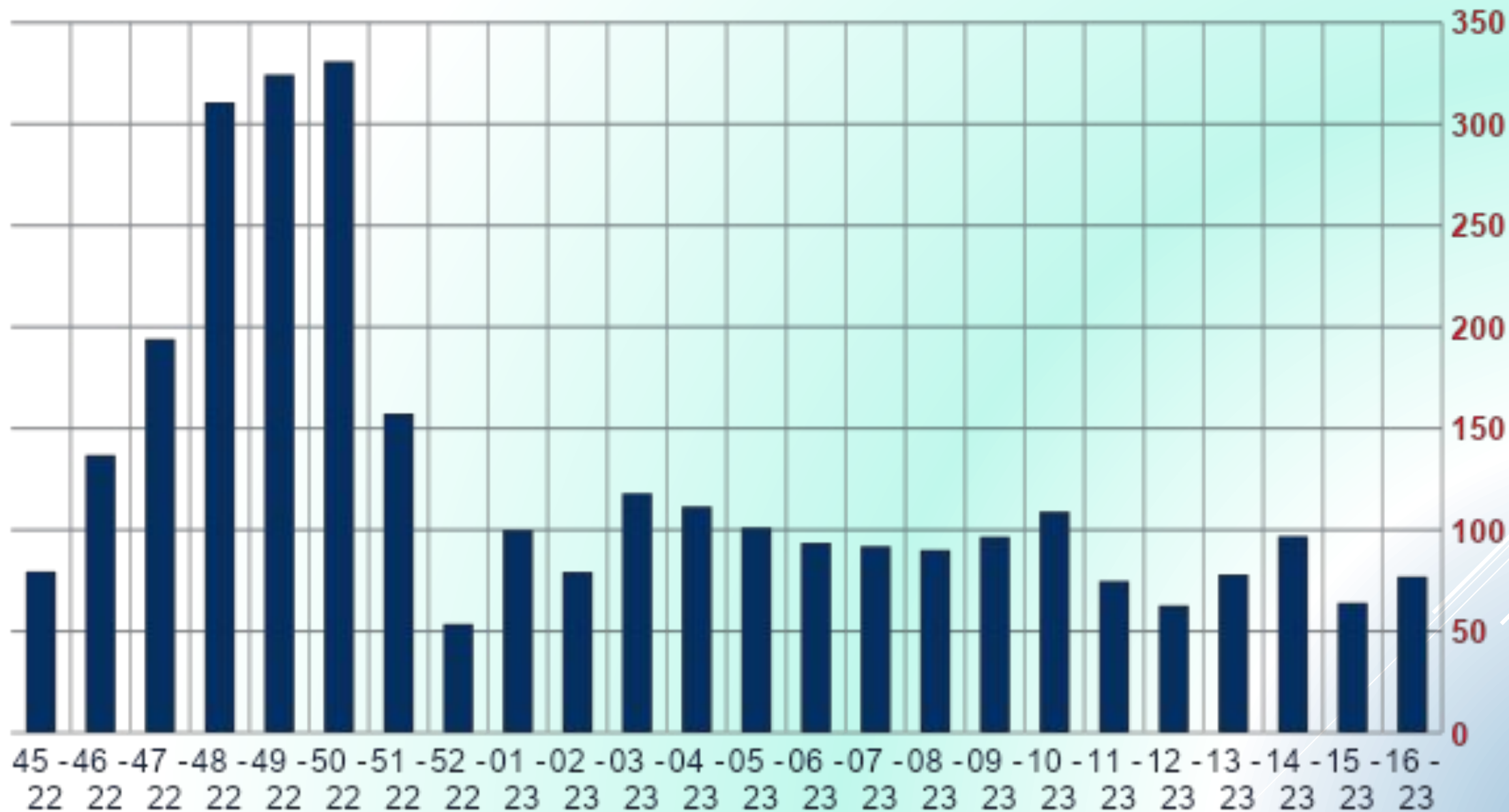
33% VS AVG



## Вартість ел/ен, €/МВт·г



## Вартість ел/ен, €/МВт·г



	R-4	Kh-2	T-1	T-2	K-5	K-6	R-1	R-2	TW-1	TW-2
2010	6136	5874	6306	6847	7293	6943	7398	4304	7540	7131
2011	5471	6846	6916	6312	7639	7625	7695	7368	7470	7546
2012	6261	5918	7160	7350	7534	7326	7569	7433	7550	7640
2013	5045	7027	7019	7247	6570	6746	8557	7833	7869	7741
2014	6178	6773	7195	6989	7581	7433	7228	7741	7767	7901
2015	6504	6042	7581	5926	7503	7198	6714	7526	7894	7667
2016	6729	6997	5787	5730	7562	7521	8834	7890	7028	7326
2017	7108	6908	8410	7252	7369	7503	7840	7734	7869	8202
2018	6819	6493	7488	7402	7561	7883	7610	6667	7075	7661
2019	6398	7220	7169	7813	7825	8043	8620	8662	8255	7644
2020	5031	4835	7294	7661	7881	8056	7443	7864	7425	7991
	67680	70932	78324	76530	82320	82279	85509	81022	83741	84452
	<b>6153</b>	<b>6448</b>	<b>7120</b>	<b>6957</b>	<b>7484</b>	<b>7480</b>	<b>7774</b>	<b>7366</b>	<b>7613</b>	<b>7677</b>



# 10. ВИСНОВКИ

1. Вибір технології AP1000 в якості пріоритетної реакторної технології легководних реакторів великої потужності для подальшого врахування при формуванні стратегії розвитку ядерної енергетики України є прийнятним, але цей вибір необхідно підтвердити з боку експлуатуючої організації з урахуванням необхідних процедур узгодження відповідного ТЕО та інших заходів згідно з діючим законодавством України.
2. При обґрунтуванні рішення щодо вибору AP1000 необхідно звернути увагу на вже відомі проблемні питання щодо впровадження технології Westinghouse, а також досвід Китаю.
3. При обґрунтуванні рішення щодо вибору ММР необхідно звернути увагу на ВИМОГИ НТД

## **ЗПБ-2008. 6.1. Апробована інженерно-технічна практика**

Технічні рішення, технології, конструкції, повинні бути апробовані досвідом експлуатації або їх застосовність доводиться результатами досліджень та випробувань.



Дякую за увагу!