

Czarnobyl

– geneza i przebieg awarii

Marek Rabiński

- Polskie Towarzystwo Nukleoniczne
- SEREN-Polska
- strefazero.org
- Narodowe Centrum Badań Jądrowych



Seminarium KEJ SEP. SEREN-Polska, PTN – Politechnika Warszawska

Zagadnienia

- Produkcja w ZSRR plutonu-239 dla celów wojskowych
- Konstrukcja reaktora RBMK i jego charakterystyki eksploatacyjne
- Historia budowy Czarnobylskiej Elektrowni Atomowej
- Przebieg awarii reaktora nr 4
- Przyczyny awarii z perspektywy fizyki reaktorów jądrowych
 - ▶ Dyskusja
 - ▶ Prezentacja możliwości odbycia praktyk studenckich w Czarnobylskiej Strefie Wykluczenia

Pluton

- Transuranowiec o liczbie atomowej 94 (liczbie protonów w jądrze)
- Znanych jest 20 izotopów o liczbach masowych od 228 do 247 (ze względu na różną liczbę neutronów w jądrze)
- Wszystkie izotopy mają identyczne właściwości chemiczne – co praktycznie uniemożliwia ich rozseparowanie metodami chemicznymi
- Pu-238 – generatory stacji kosmicznych
- Pu-239 – głowice jądrowe

Izotop	Półokres rozpadu
Pu-228	1,1 s
Pu-229	120 s
Pu-230	1,70 m
Pu-231	8,6 m
Pu-232	33,7 m
Pu-233	20,9 m
Pu-234	8,8 h
Pu-235	25,3 m
Pu-236	2,858 y
Pu-237	45,2 d
Pu-238	87,7 y
Pu-239	24 110,0 y
Pu-240	6 561,0 y
Pu-241	14,290 y
Pu-242	375 000,0 y
Pu-243	4,956 h
Pu-244	80,8 mln y
Pu-245	10,5 h
Pu-246	10,85 d
Pu-247	2,27 d

Zawartość Pu-240 w plutonie

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Superwysoka czystość do zastosowań militarnych		>97%	<3%		
Jakość militarna (główce jądrowe) <7%		>93%	<7%		
Jakość reaktorowa (paliwo do reaktorów energetycznych) >7%	~2%	~53%	~24%	~15%	~6%



Pluton wojskowy Pu-239

- Specyficzne właściwości plutonu-239 powodują, że jest on praktycznie niezastąpionym materiałem na głowice jądrowe
- Jest wytwarzany w moderowanych grafitem reaktorach wojskowych – podczas naświetlania uranu-238 strumieniem neutronów, przez 2-3 miesiące w naturalnym lub lekko wzbogaconym uranie
- Wyodrębnienie plutonu z wypalonego paliwa jądrowego jest relatywnie proste – wykorzystuje różnicę właściwości chemicznych produktów rozszczepienia

Pluton wojskowy Pu-239

- 2 grudnia 1942 – Enrico Fermi uruchamia pierwszy reaktor jądrowy Chicago Pile 1
- 4 listopada 1943 – rozruch reaktora X-10 do produkcji Pu-239 (Oak Ridge, USA)
- 20 lipca 1945 – Ł. Beria pełnomocnikiem d/s atomistyki
- 20 sierpnia 1945 – tajny komitet d/s prac nad uranem
- 23 marca 1946 – decyzja o budowie Kombinatu nr 817
- 16 lipca 1946 – test amerykańskiej bomby w Los Alamos
- 25 grudnia 1946 – Kurczatow uruchamia reaktor F-1
- 8 czerwca 1948 – uruchomienie pierwszego radzieckiego reaktora do produkcji Pu-239 (wzorowanego na X-10)
- 26 luty 1949 – pierwszy pluton z Kombinatu nr 817
- 29 sierpnia 1949 – test radzieckiej bomby atomowej na poligonie w Semipalatyńsku

Pluton wojskowy Pu-239

- Laboratorium nr 2 (późniejszy Instytut Kurczatowa)

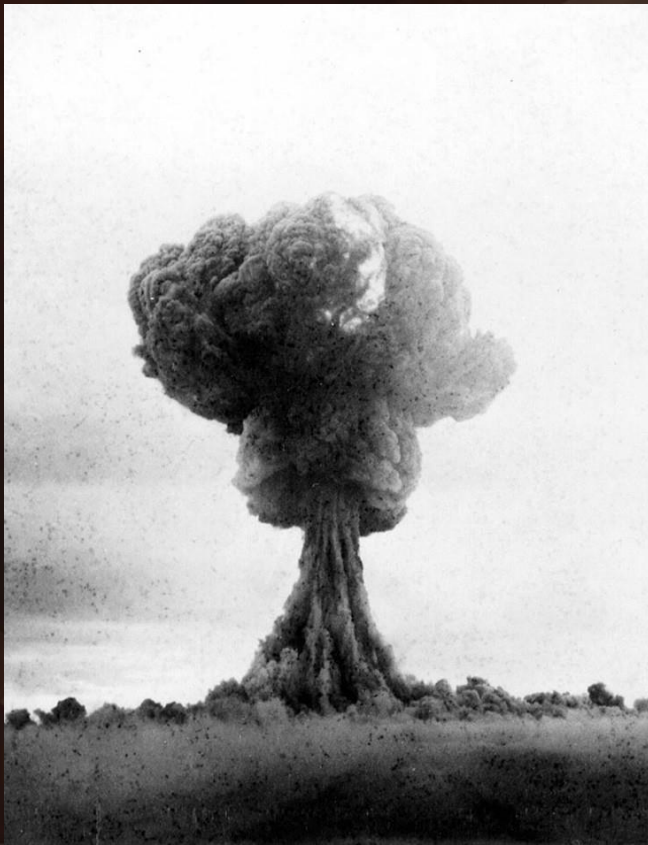


- Reaktor F-1



Produkcja plutonu w ZSRR

- 14 reaktorów ZSRR (A, AD, AI, ADE) do produkcji Pu-239 – reaktory na nisko-wzbogacony uran, z moderatorem grafitowym, chłodzonych powietrzem (w późniejszych modelach – azotem)



Produkcja plutonu w ZSRR



■ Reaktor A (*Anuszk*a)

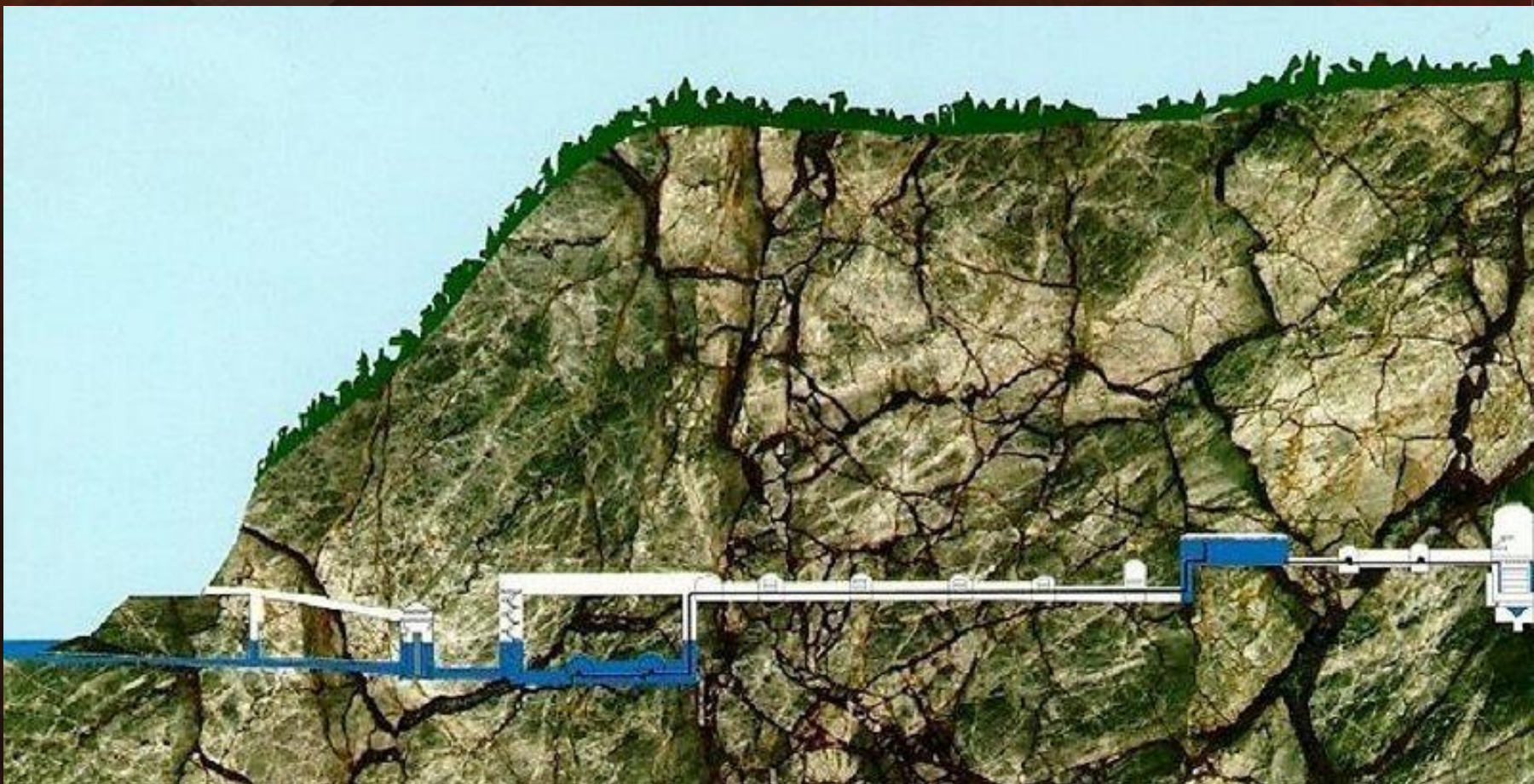
Produkcja plutonu w ZSRR

■ Krasnojarsk-26 (200-250 m pod powierzchnią)



Produkcja plutonu w ZSRR

■ Krasnojarsk-26 (200-250 m pod powierzchnią)



Początki energetyki jądrowej

- 26 czerwca 1954 – propagandowe uruchomienie reaktora AM-1 w Obnińsku, 5 MW(e) / 36 MW(t) [14%]
- 17 października 1956 – Magnox w Calder Hall (Wielka Brytania) 50 MW(e) / 268 MW(t) [19%]
- 2 grudnia 1957 – PWR w Shippingport (USA) 60 MW(e) / 255 MW(t) [24%] – pierwsza w pełni komercyjna elektrownia jądrowa
- Trudności ZSRR z wdrożeniem technologii reaktorów wodnych ciśnieniowych stały się bezpośrednim impulsem do opracowania koncepcji reaktorów RBMK – rozmowa Nikity Chruszczowa z Jefimem Sławskim

Reaktor RBMK

- Reaktor RBMK (ros: reaktor kanałowy dużej mocy) opracowano w Związku Radzieckim w czasach 'zimnej wojny'
- Powstał przez dodanie obiegu wodnego do reaktora na nisko-wzbogacony uran z moderatorem grafitowym chłodzonym azotem, którego założeniem projektowym było wytwarzanie militarnego plutonu Pu-239
- 15 kwietnia 1966 – zatwierdzenie pierwszego projektu RBMK dla elektrowni jądrowej w Leningradzie

Klasyfikacja reaktorów jądrowych

neutrony
termiczne

reaktory termiczne

moderator

lekka woda (LWR)

ciężka woda (HWR)

grafit

chłodziwo

lekka woda
2 obiegi
(PWR)

lekka woda
1 obieg
(BWR)

ciężka woda
(PHWR)

lekka woda
(HWLWR)

CO₂
(GCR)

hel
(GCR)

wzbogacenie
uranu

słabo
wzbogacony
(PWR)

słabo
wzbogacony
(BWR)

naturalny
(CANDU)

bardzo słabo
wzbogacony
(CANDU)

słabo
wzbogacony
(SGHWR)

naturalny
(Magnox)

słabo
wzbogacony
(AGR)

wysoko
wzbogacony
(HTGR)

Klasyfikacja reaktorów jądrowych

neutrony termiczne

reaktory termiczne

moderator

lekka woda (LWR)

ciężka woda (HWR)

grafit

chłodziwo

lekka woda
2 obiegi
(PWR)

lekka woda
1 obieg
(BWR)

ciężka woda
(PHWR)

lekka woda
(HWLWR)

CO₂
(GCR)

hel
(GCR)

wzbogacenie uranu

naturalny
(CANDU)

bardzo słabo
wzbogacony
(CANDU)

bardzo słabo
wzbogacony
(RBMK)

słabo
wzbogacony
(PWR)

słabo
wzbogacony
(BWR)

słabo
wzbogacony
(SGHWR)

słabo
wzbogacony
(AGR)

wysoko
wzbogacony
(HTGR)

energia
elektryczna

Pu-239
(militarny)

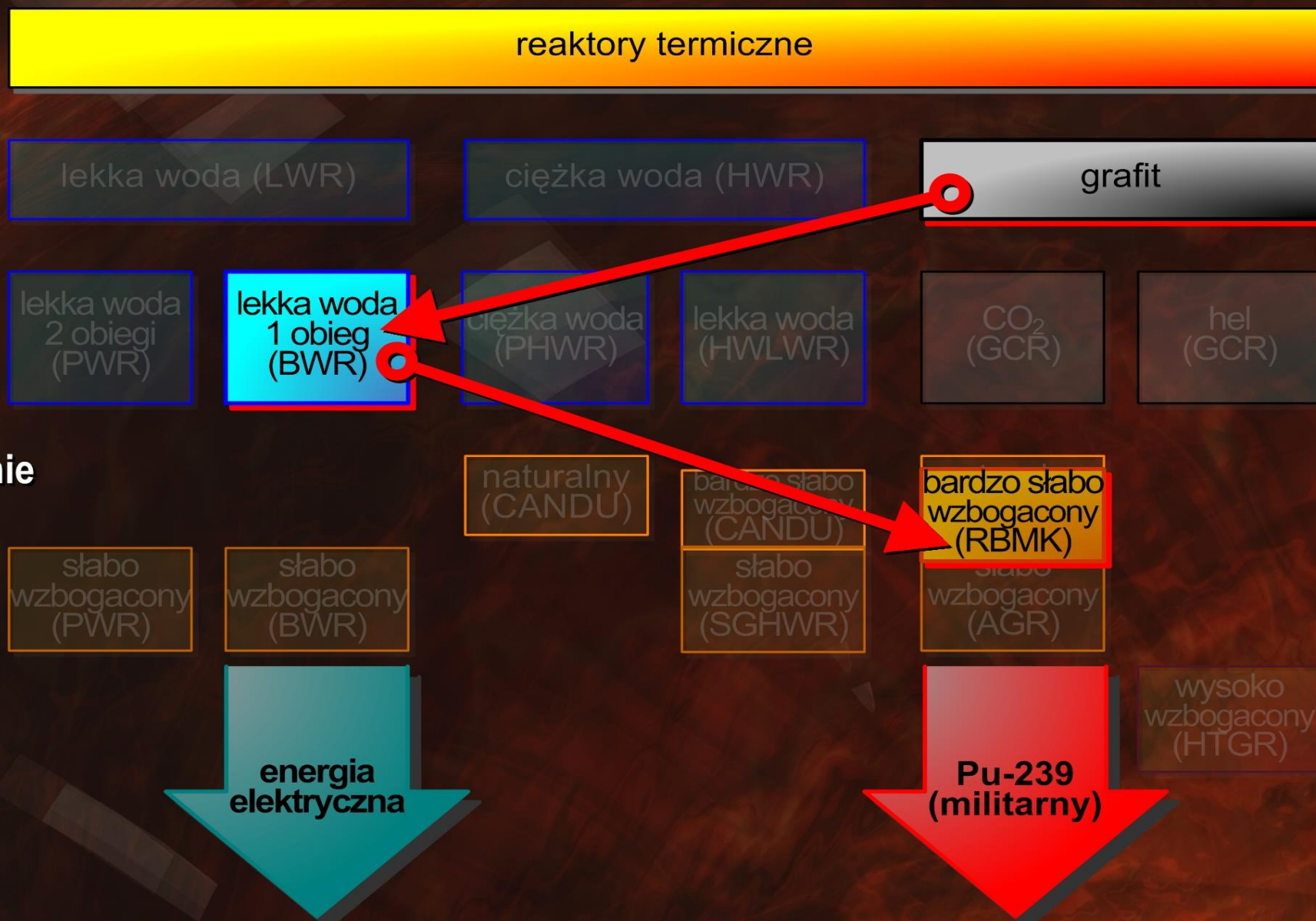


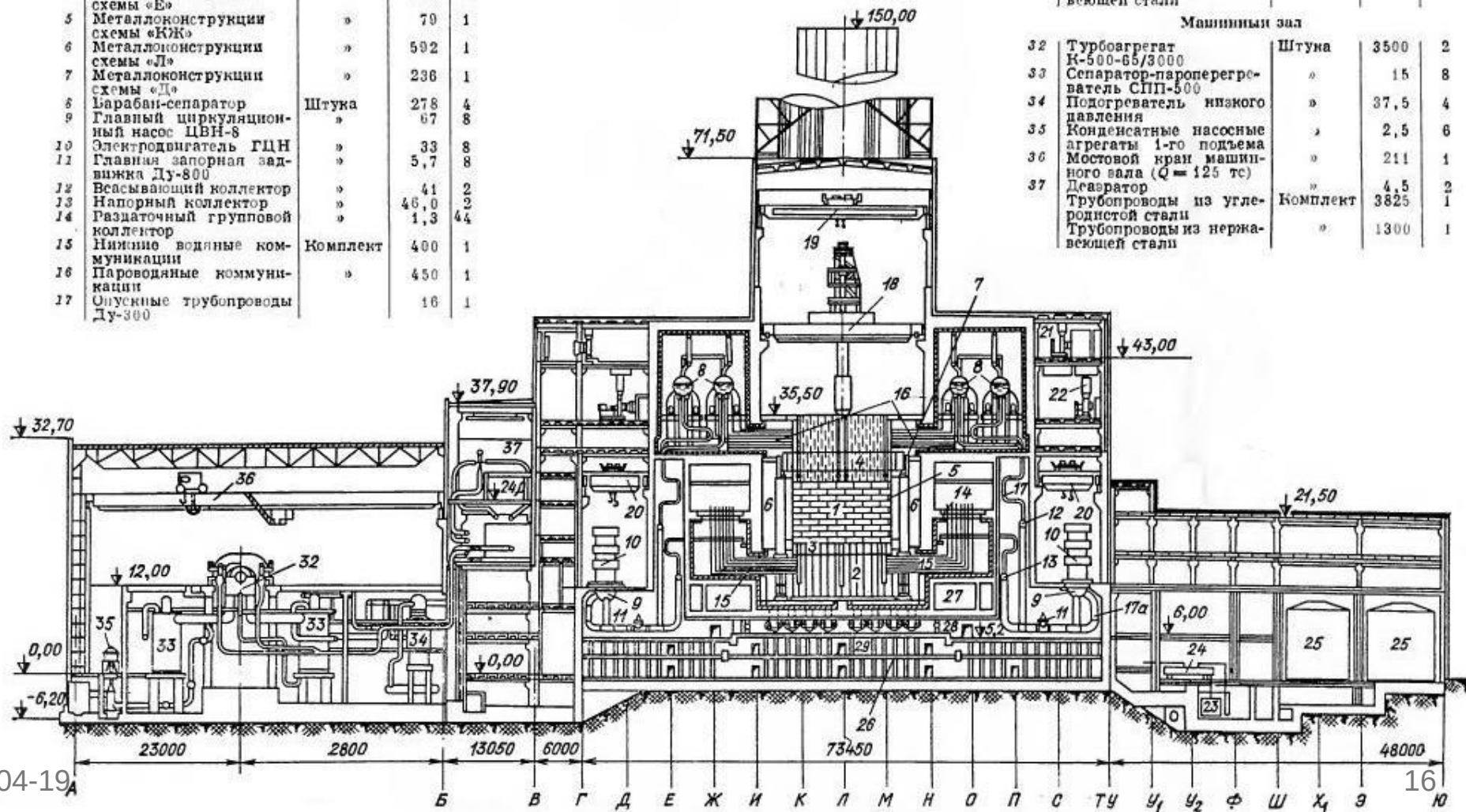
Рис. 1. Разрез по главному корпусу АЭС с РБМК-1000, включая зону локализации Перечень основного оборудования главного корпуса АЭС

Номер позиции	Наименование	Единица измерения	Масса	Количество
Реакторное отделение				
1	Графитовая кладка	Комплект	1850	1
2	Металлоконструкции схемы «С»	»	126	1
3	Металлоконструкции схемы «ОР»	»	280	1
4	Металлоконструкции схемы «Е»	»	450	1
5	Металлоконструкции схемы «КЖ»	»	70	1
6	Металлоконструкции схемы «Л»	»	592	1
7	Металлоконструкции схемы «Д»	»	236	1
8	Барaban-сепаратор	Штука	278	4
9	Главный циркуляционный насос ЦВН-8	»	67	8
10	Электродвигатель ГЦН	»	33	8
11	Главная запорная задвижка Ду-800	»	5,7	8
12	Всасывающий коллектор	»	41	2
13	Напорный коллектор	»	46,0	2
14	Раздаточный групповой коллектор	»	1,3	44
15	Нижние водяные коммуникации	Комплект	400	1
16	Пароводяные коммуникации	»	450	1
17	Опускные трубопроводы Ду-300	»	16	1

17a	Трубопроводы контура МПЦ	Ду-800	Комплект	350	1
18	Разгрузочно-загрузочная машина	»	»	450	1
19	Мостовой кран	»	Штука	121	1
20	Вентилятор	»	»	176	2
21	Вентилятор	»	»	3,5	30
22	Вытяжной вентилятор на отметке +35,0	»	»	3,5	50
23	Бак организованных протечек	»	»	1,4	2
24	Теплообменник организованных протечек	»	»	0,2	2

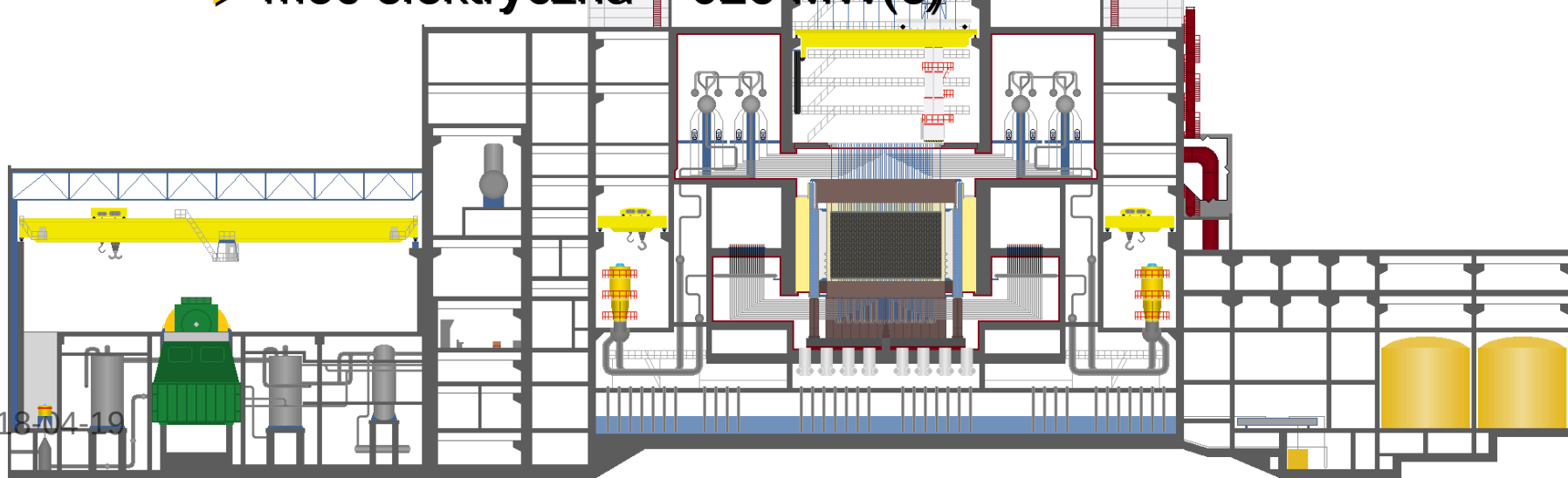
25	Баки планово-предупредительных ремонтных работ	Штука	25	4
26	Металлоконструкции и трубопроводы зоны локализации аварий	Комплект	270	1
27	Обратные клапаны помещения нижних водяных коммуникаций	»	2,5	11
28	Перепускной клапан системы локализации аварий	Штука	2	8
29	Конденсаторы системы локализации аварий	»	3,7	36
30	Вагон-контейнер	»	146	1
31	Кран в помещении УПАК (Q = 30/5 тс)	»	45	1
	Трубопроводы из углеродистой стали	Комплект	1170	1
	Трубопроводы из нержавеющей стали	»	760	1

Машинный зал				
32	Турбоагрегат Н-500-65/3000	Штука	3500	2
33	Сепаратор-пароперегреватель СПП-500	»	15	8
34	Подогреватель низкого давления	»	37,5	4
35	Конденсатные насосные агрегаты 1-го подъема	»	2,5	6
36	Мостовой кран машинного зала (Q = 125 тс)	»	211	1
37	Демаратор	»	4,5	2
	Трубопроводы из углеродистой стали	Комплект	3825	1
	Трубопроводы из нержавеющей стали	»	1300	1

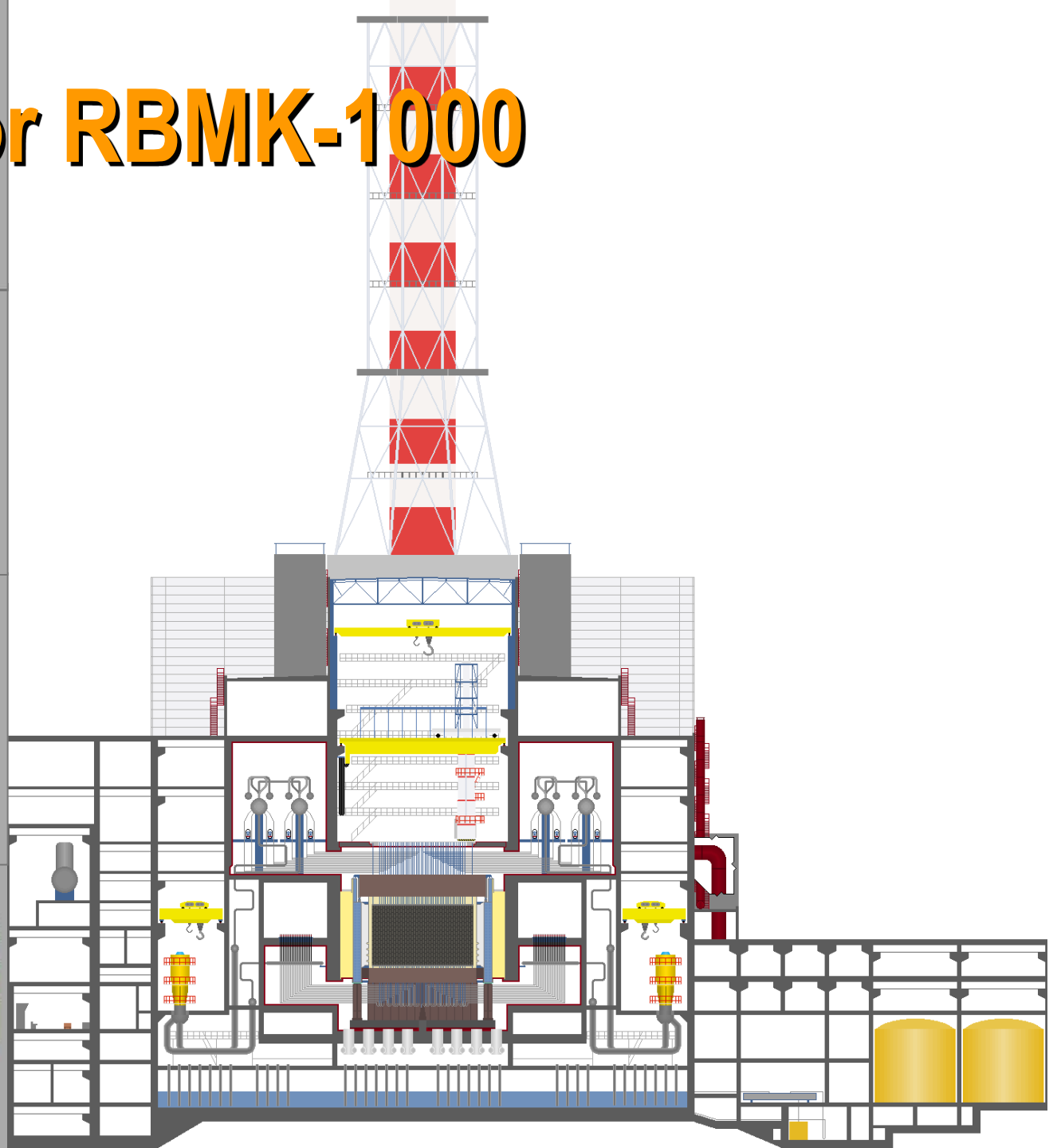
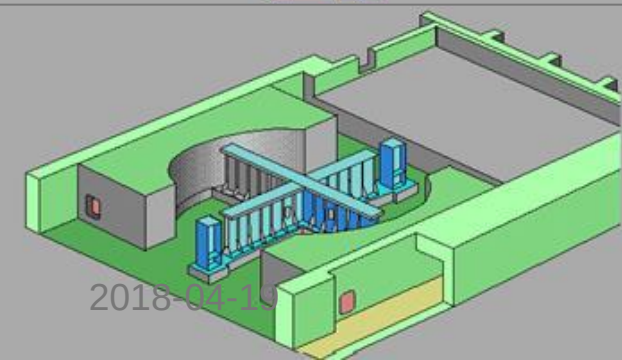
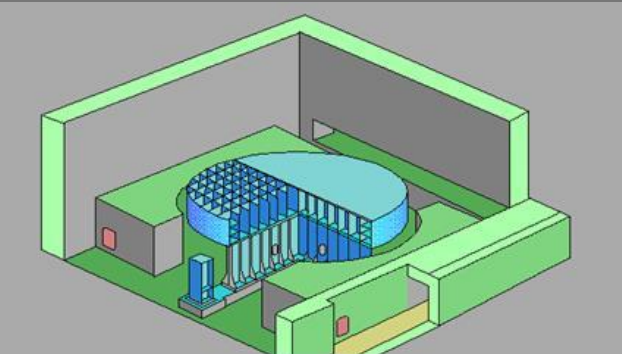
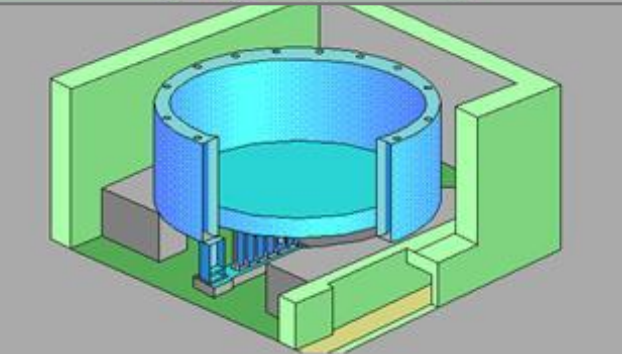
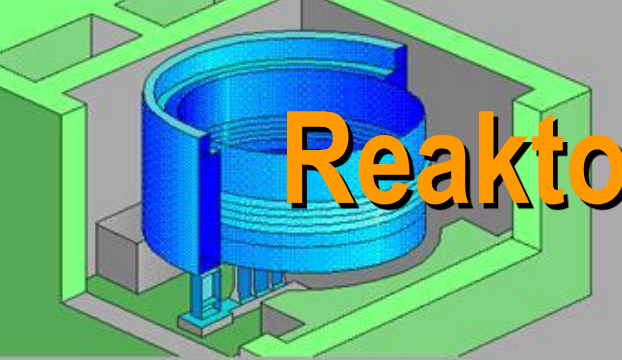


Reaktor RBMK-1000

- ▶ 200 ton paliwa (UO_2 o wzbogaceniu 1.8%), 2 500 ton grafitu (moderator)
- ▶ średnica rdzenia 11.8 m, wysokość 7 m
- ▶ 1 661 kaset z elementami paliwowymi
- ▶ 1 500 pionowych kanałów paliwowych (z cyrkonu), 211 kanałów sterowania, dodatkowe pręty regulacyjne wsuwane od dołu, kanały kontrolne
- ▶ moc cieplna – 3 200 MW(t),
- ▶ moc elektryczna – 925 MW(e)



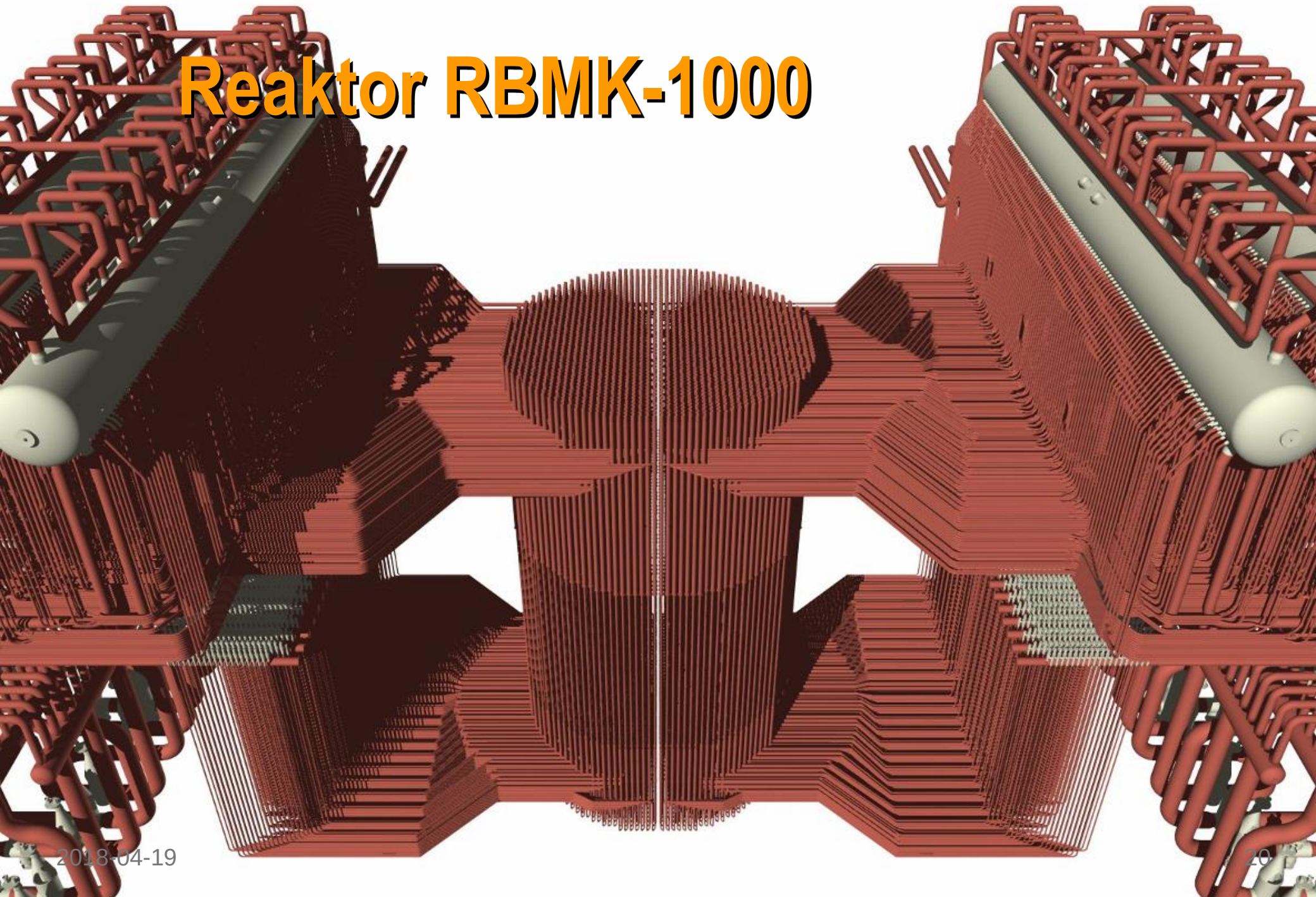
Reaktor RBMK-1000



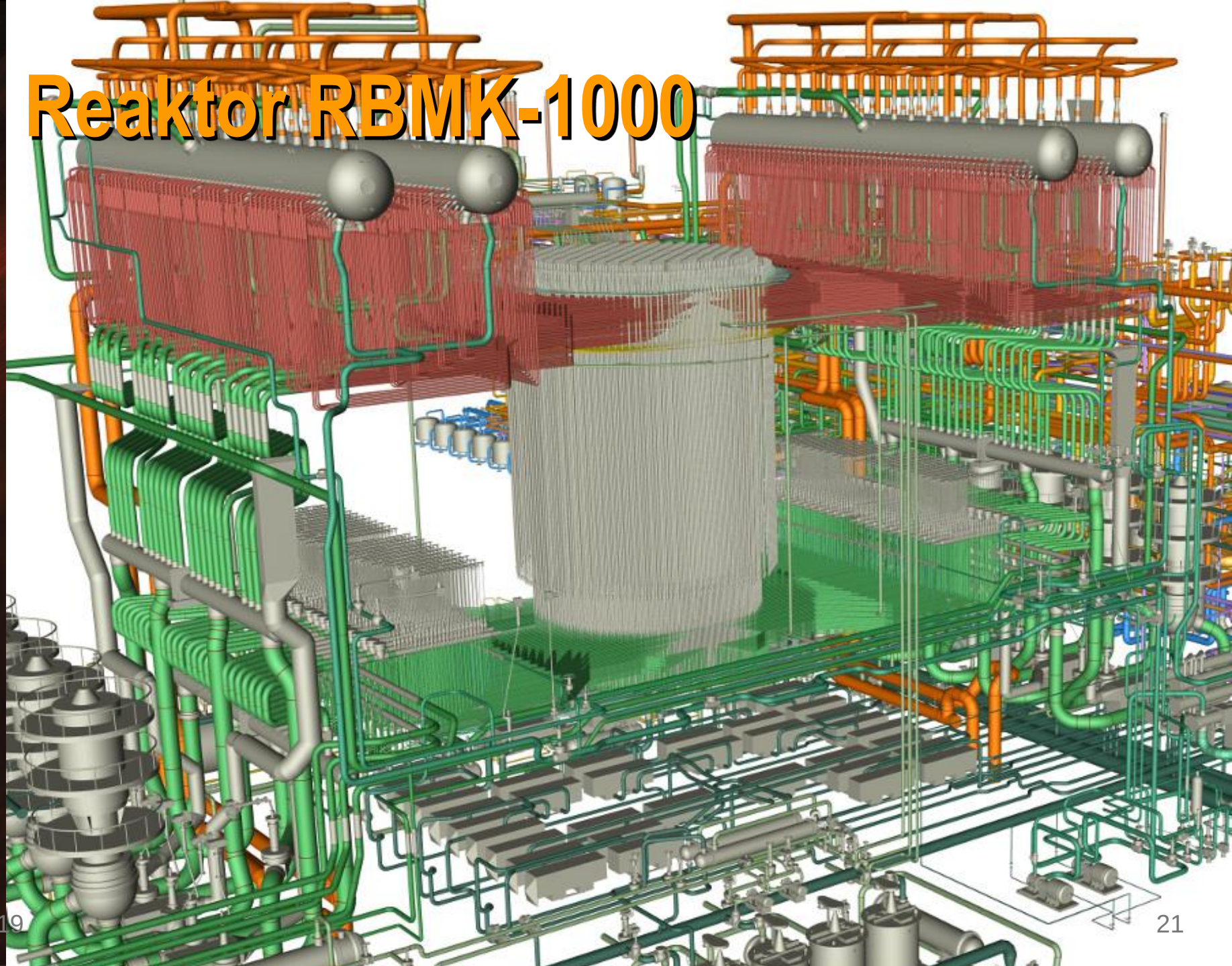
Reaktor RBMK-1000



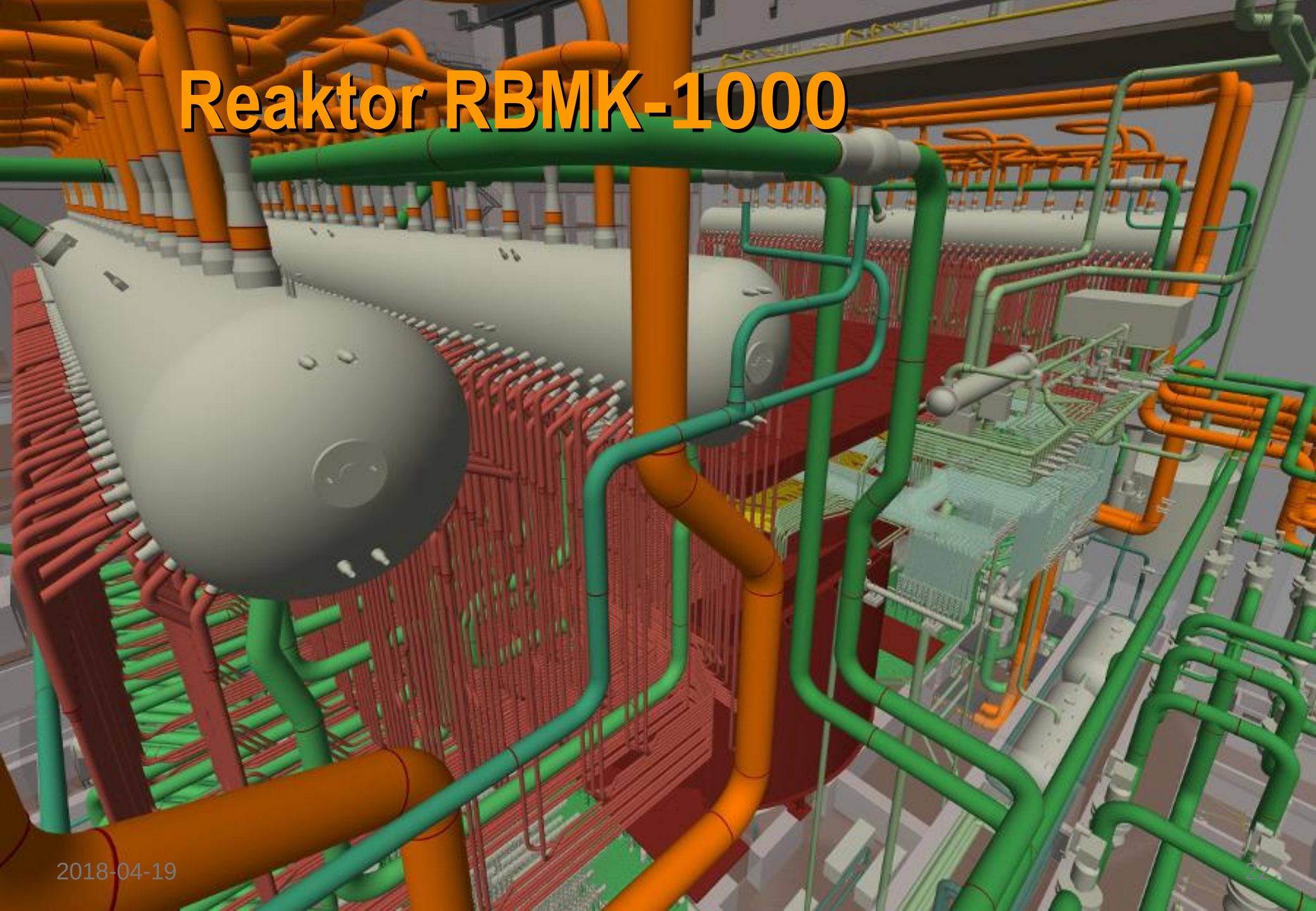
Reaktor RBMK-1000



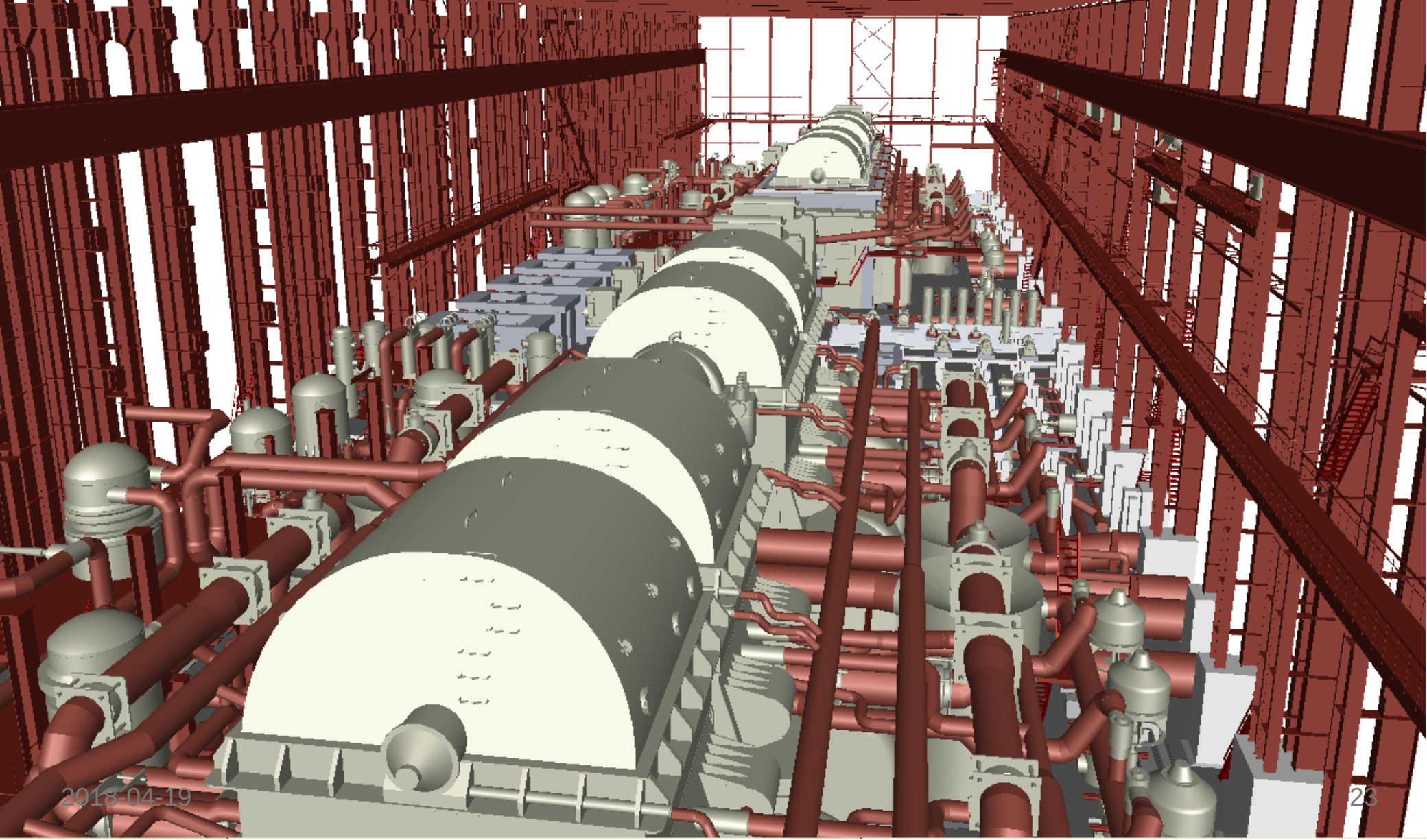
Reaktor RBMK-1000



Reaktor RBMK-1000



Reaktor RBMK-1000



EJ Czarnobyl (etap I)



УСЛОВИЯ

Наименование

№	Наименование
1	Территория
2	Поселенный жил. поселок
3	Территория перспективного развития жил. поселка
4	Вспомогательные сооружения
5	Б. ГРЭС
6	Зем. зап. предприятия
7	Б. газ. хозяйства
8	Вспомогат. котельная
9	Участок общежитий и коммунального квартала
10	Транспортный и автобусный парк
11	Х. и завод

ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АЭС

EJ Czarnobyl (etap I)



- 1 РЕАКТОРНЫЙ ЗАЛ
- 2 МАШИННЫЙ ЗАЛ
- 3 АДМИНИСТРАТИВНО-БЫТОВОЙ КОРПУС
- 4 СТОЛОВАЯ
- 5 КОМПРЕССОРНАЯ СТАНЦИЯ
- 6 АЗОТНО-КИСЛОРОДНАЯ СТАНЦИЯ
- 7 ХРАНЕНИЕ ЖИДКИХ ОТХОДОВ
- 8 ДИЗЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ
- 9 ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ КОРПУС
С МЕХАНИЧЕСКИМИ МАСТЕРСКИМИ
И ХИМИЧЕСКОЙ

- 10 АВТОХОЗЯЙСТВО
- 11 ПУСКО-РЕЗЕРВНАЯ КОТЕЛЬНАЯ
- 12 ИСКУССТВЕННОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ
- 13 ВОДОПОДВОДЯЩИЙ КАНАЛ
С НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ

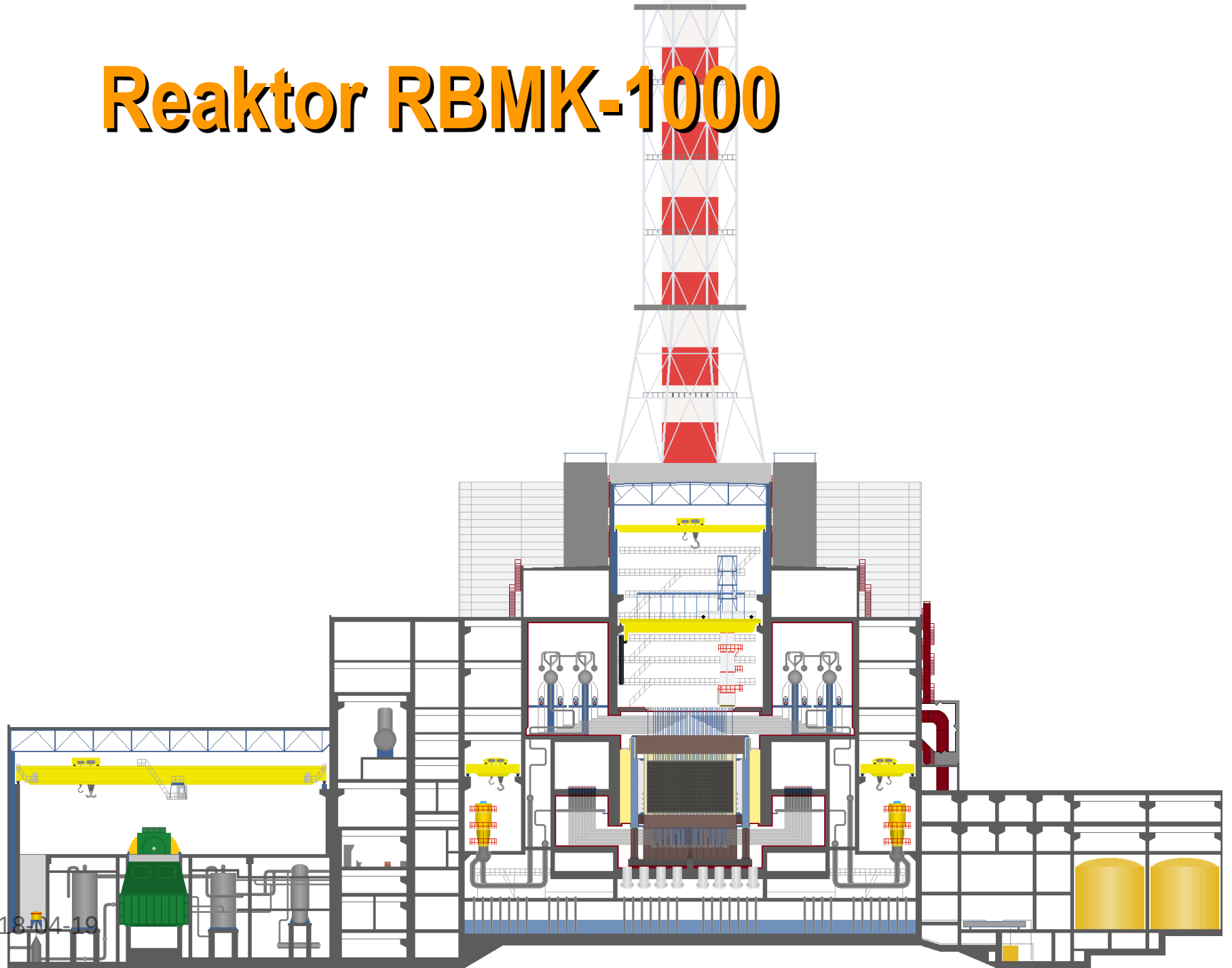
- 14 НАПОРНЫЙ БАССЕЙН С ВОДО-
ЗАБОРНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ
- 15 МЕХАНО-СБОРОЧНАЯ
- 16 ВЕНТИЛЯЦИОННАЯ ТРУБА
- 17 ЭСТАКАДА

EJ Czarnobyl

Czarnobylska Elektrownia Atomowa im. W.I. Lenina – początek budowy w 1970 roku

- Pierwsza generacja RBMK-1000
 - ▶ 1 blok – 740 MW(e) [nigdy nie osiągnął mocy znamionowej]
 - ▶ 2 blok – 800 MW(e)
- Druga generacja
 - ▶ 3 i 4 blok – 925 MW(e)
- Trzecia generacja
 - ▶ 5 i 6 blok – 950 MW(e)
- Czwarty etap rozbudowy elektrowni (RBMK-1500)
 - ▶ 7-10 blok – 1 185 MW(e), 1 380 MW(e)

Reaktor RBMK-1000



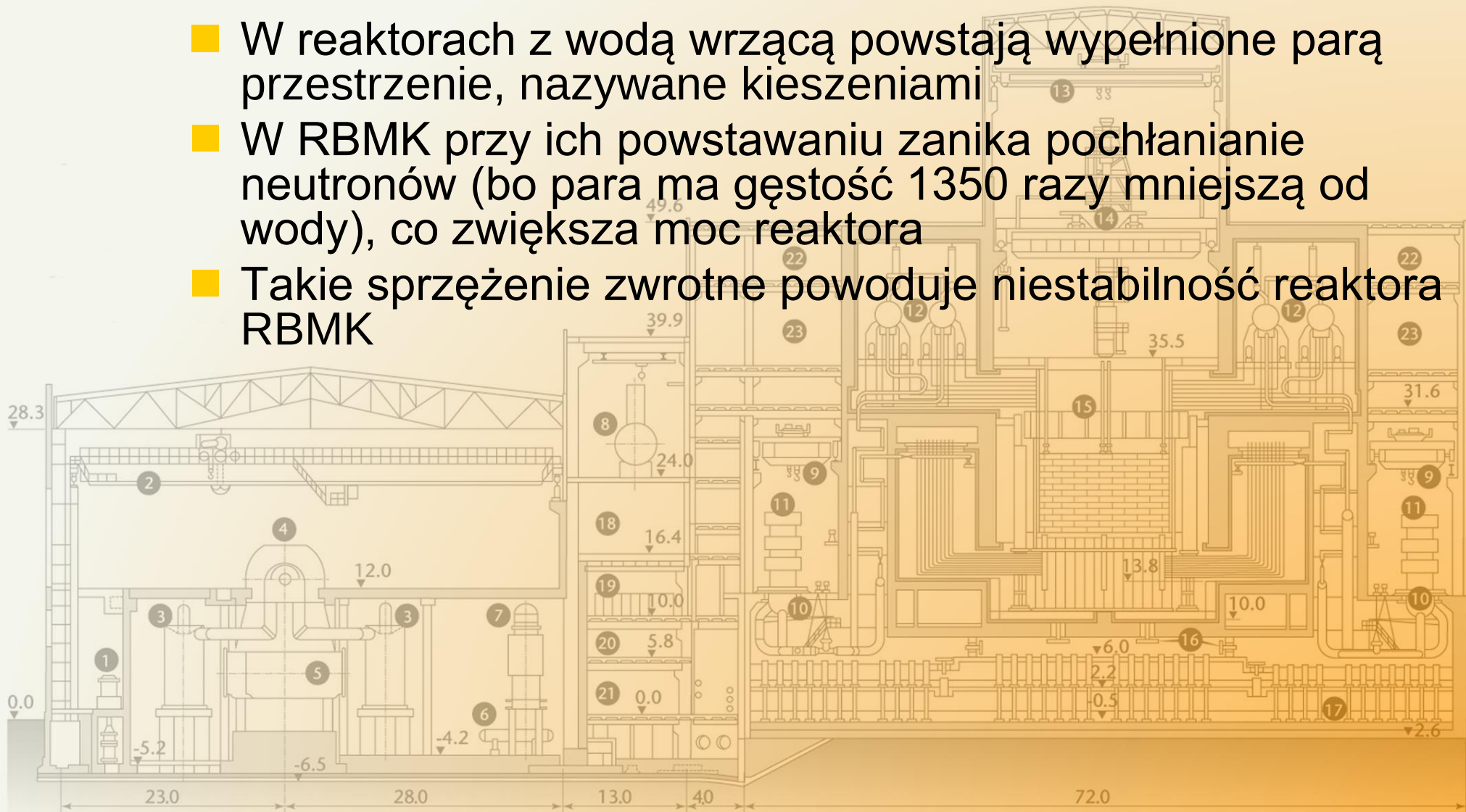
Reaktor RBMK-1000

■ Płyta górna reaktora nr 3



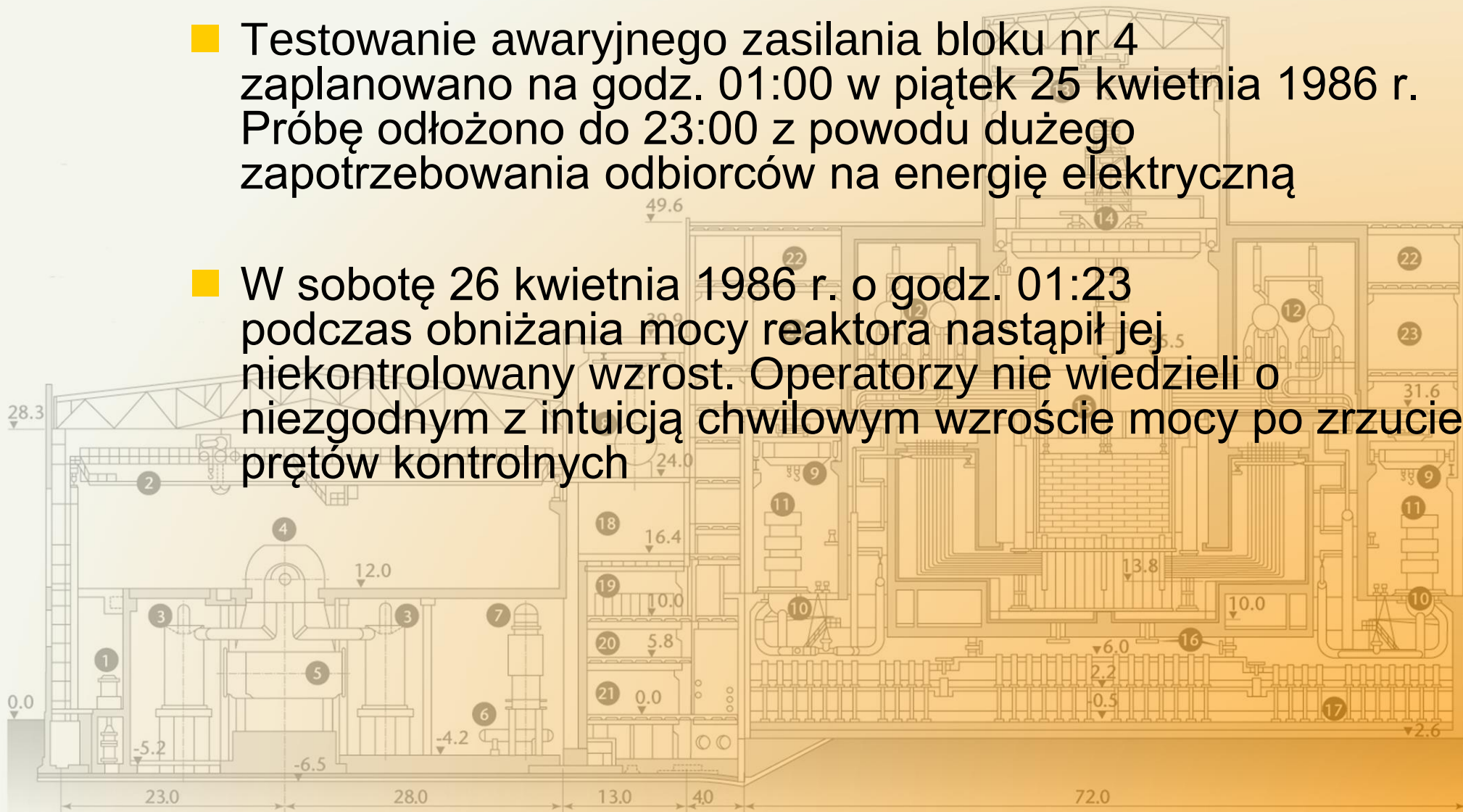
Awaria EJ Czarnobyl

- W reaktorach z wodą wrzącą powstają wypełnione parą przestrzenie, nazywane kieszeniami
- W RBMK przy ich powstawaniu zanika pochłanianie neutronów (bo para ma gęstość 1350 razy mniejszą od wody), co zwiększa moc reaktora
- Takie sprzężenie zwrotne powoduje niestabilność reaktora RBMK



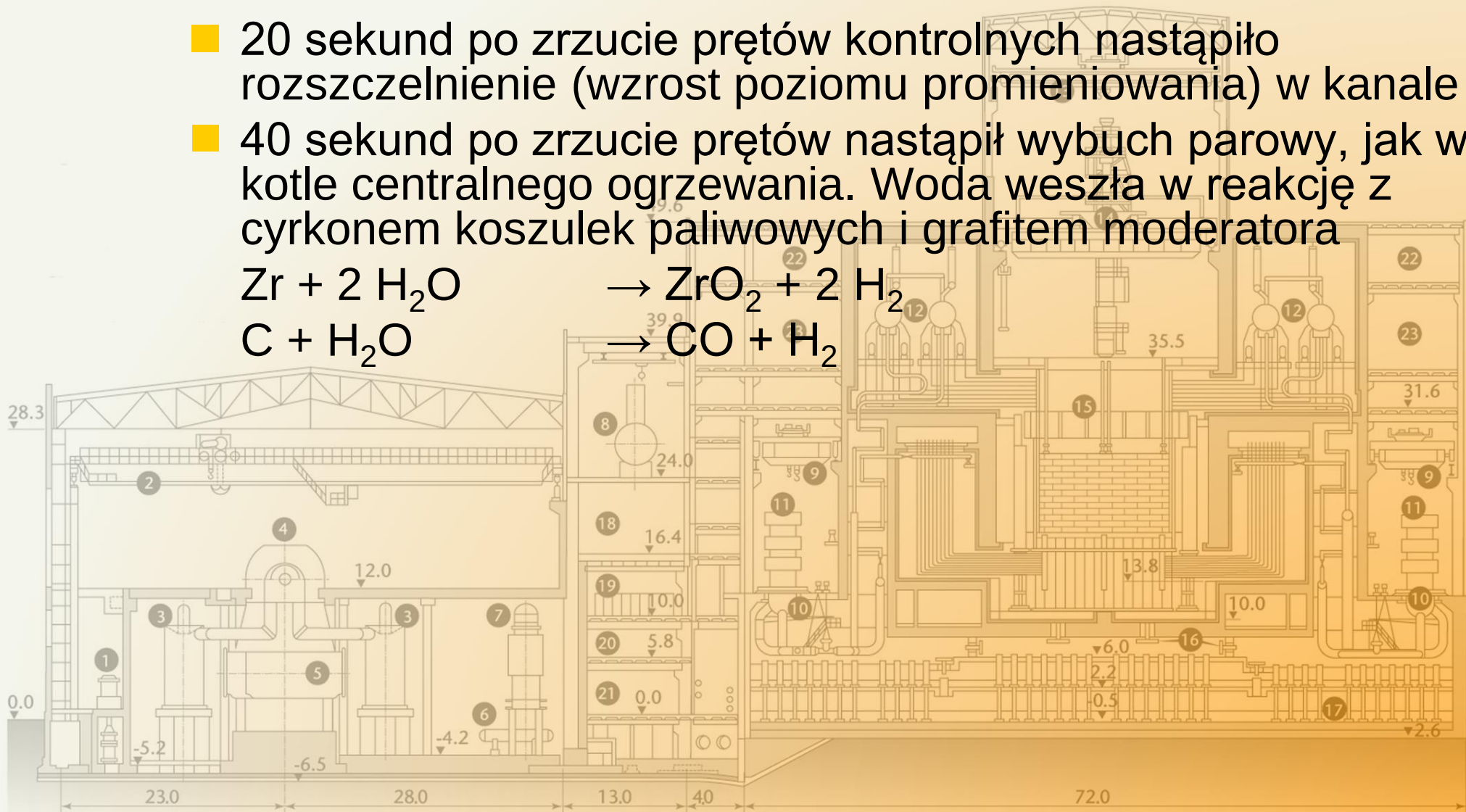
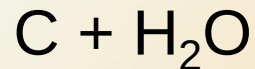
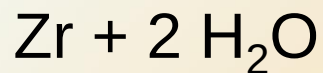
Awaria EJ Czarnobyl

- Testowanie awaryjnego zasilania bloku nr 4 zaplanowano na godz. 01:00 w piątek 25 kwietnia 1986 r. Próbę odłożono do 23:00 z powodu dużego zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną
- W sobotę 26 kwietnia 1986 r. o godz. 01:23 podczas obniżania mocy reaktora nastąpił jej niekontrolowany wzrost. Operatorzy nie wiedzieli o niezgodnym z intuicją chwilowym wzroście mocy po zrzucie prętów kontrolnych



Awaria EJ Czarnobyl

- 20 sekund po zrzucie prętów kontrolnych nastąpiło rozszczelnienie (wzrost poziomu promieniowania) w kanale
- 40 sekund po zrzucie prętów nastąpił wybuch parowy, jak w kotle centralnego ogrzewania. Woda weszła w reakcję z cyrkonem koszulek paliwowych i grafitem moderatora



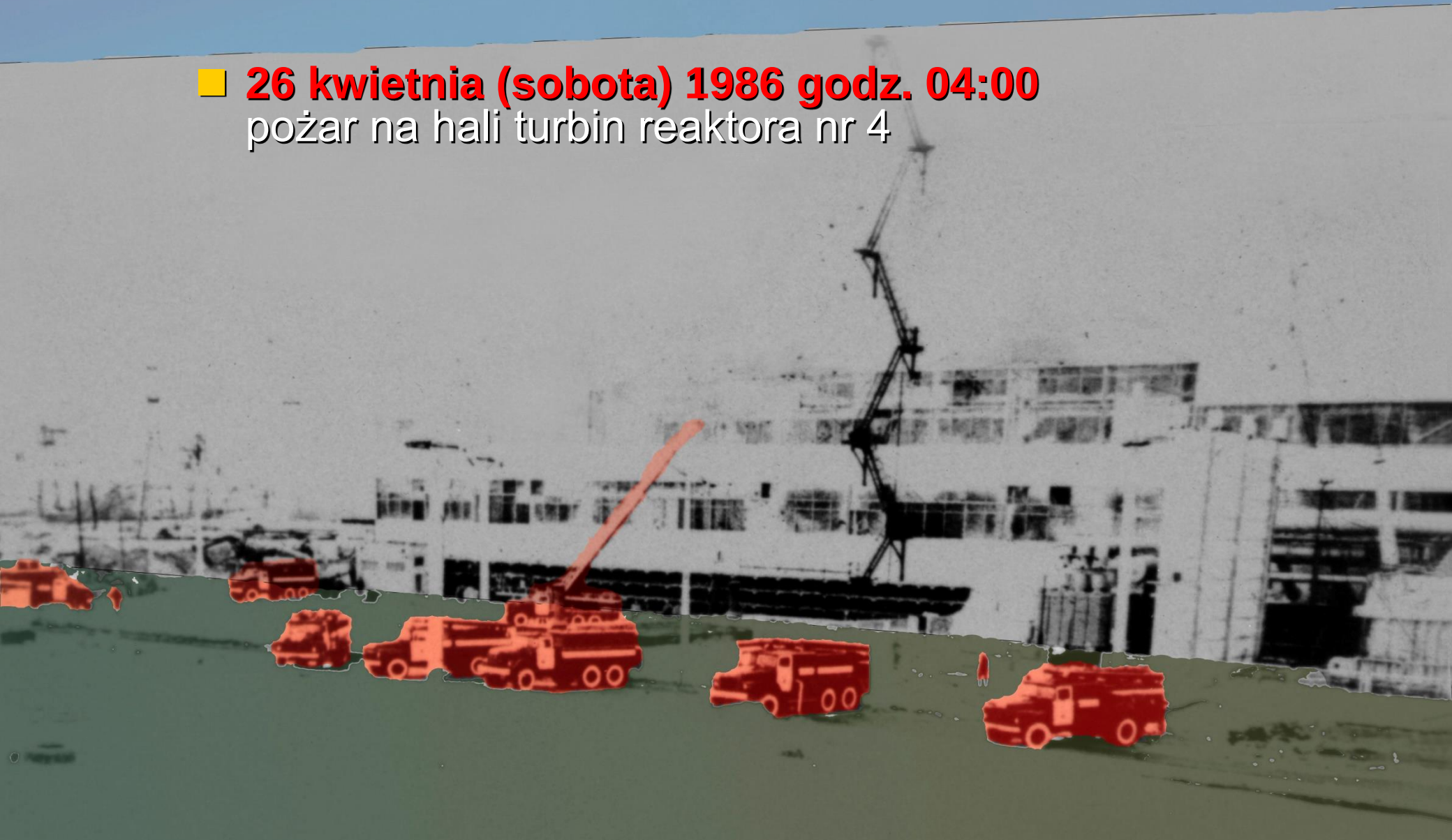
Awaria EJ Czarnobyl

- **26 kwietnia (sobota) 1986 godz. 04:00**
pożar na hali turbin reaktora nr 4



Awaria EJ Czarnobyl

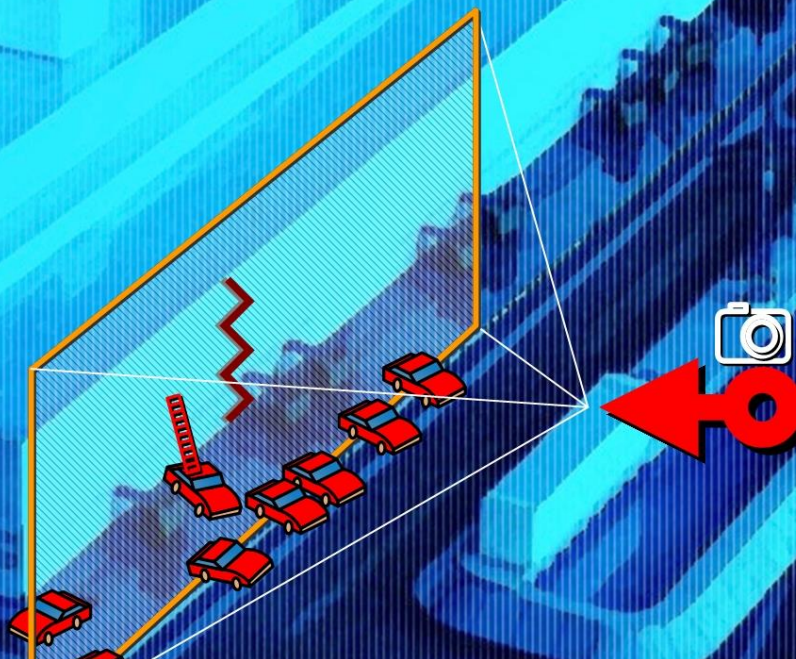
- **26 kwietnia (sobota) 1986 godz. 04:00**
pożar na hali turbin reaktora nr 4



Awaria EJ Czarnobyl



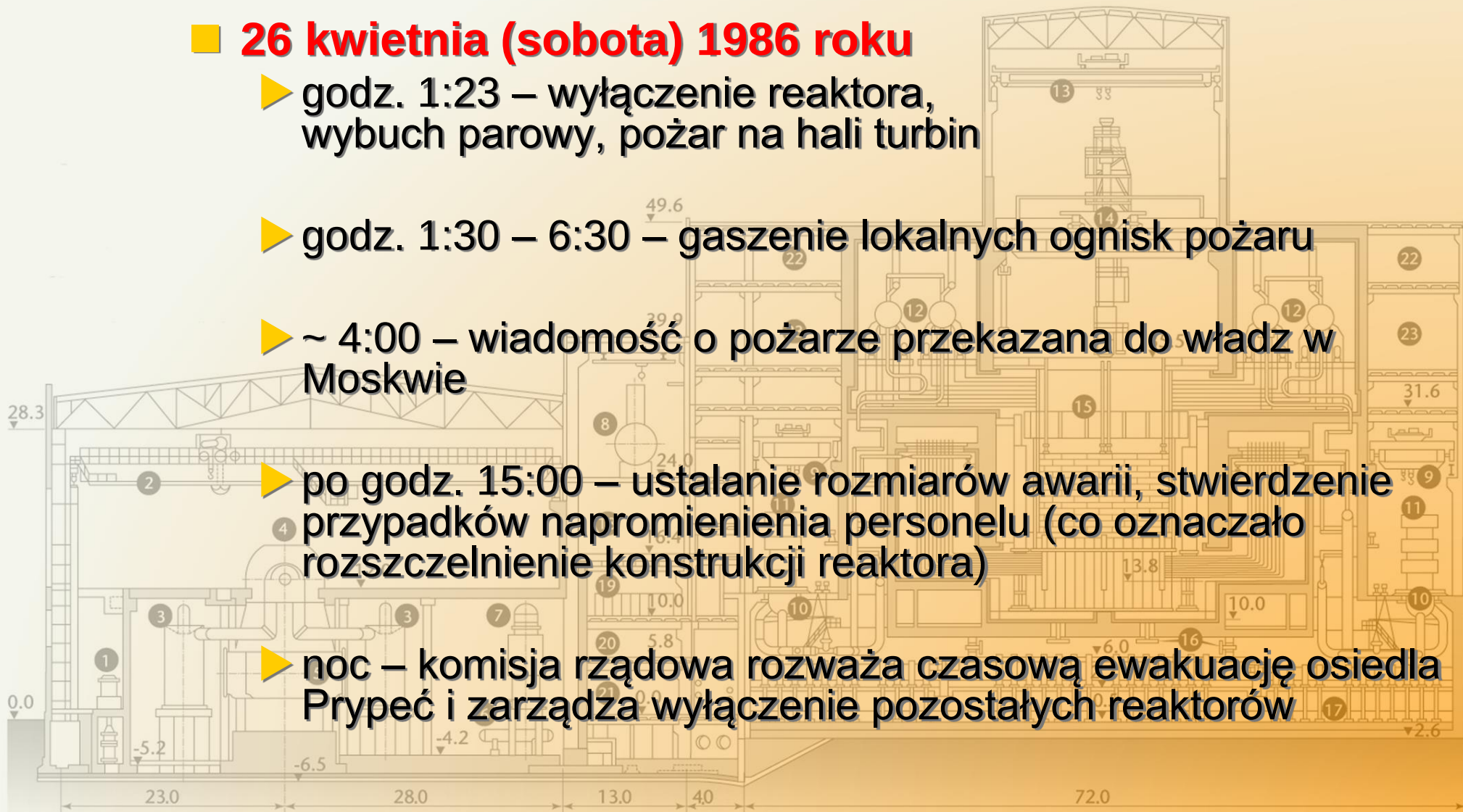
- **26 kwietnia (sobota) 1986 godz. 04:00**
pożar na hali turbin reaktora nr 4



Awaria EJ Czarnobyl

■ 26 kwietnia (sobota) 1986 roku

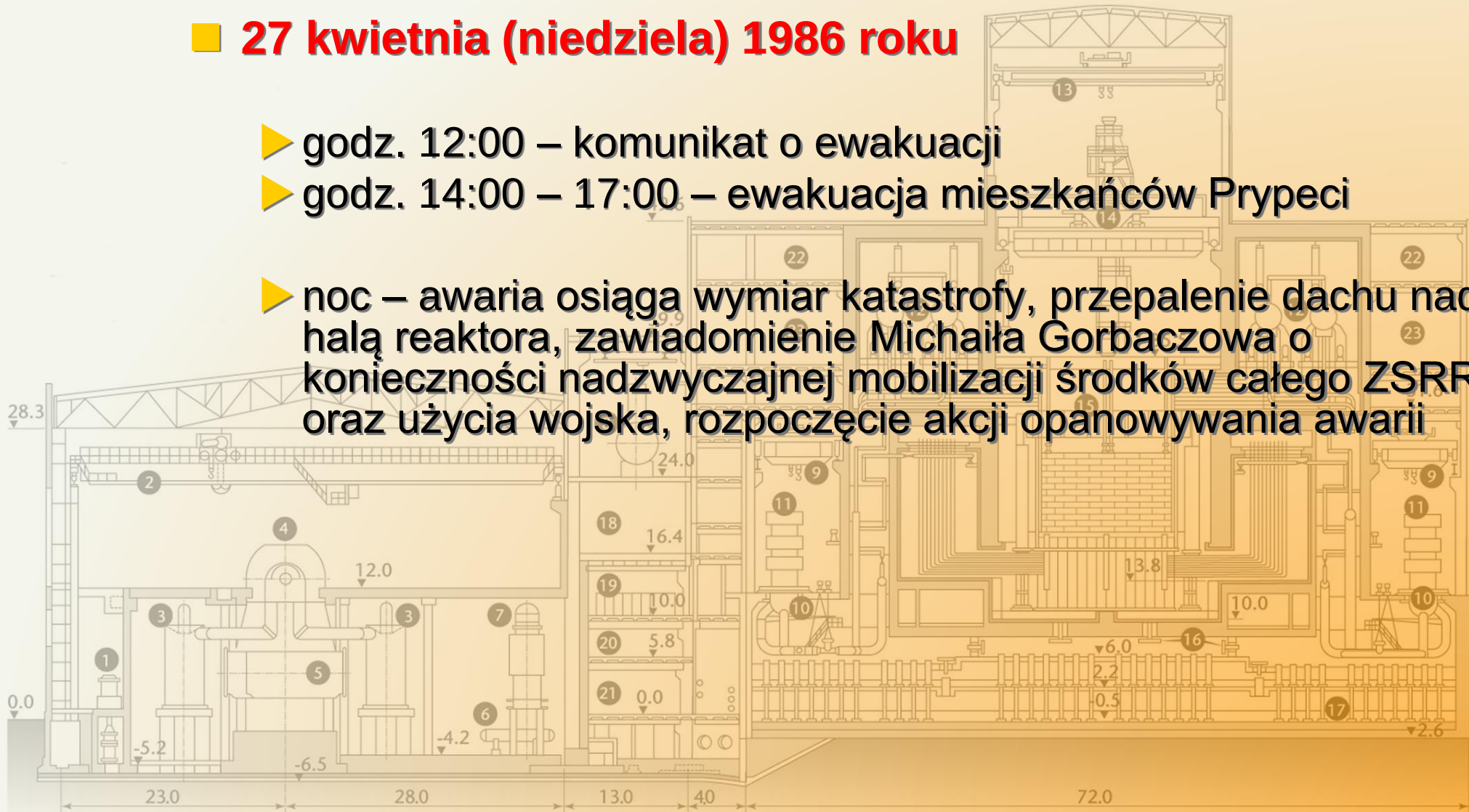
- ▶ godz. 1:23 – wyłączenie reaktora, wybuch parowy, pożar na hali turbin
- ▶ godz. 1:30 – 6:30 – gaszenie lokalnych ognisk pożaru
- ▶ ~ 4:00 – wiadomość o pożarze przekazana do władz w Moskwie
- ▶ po godz. 15:00 – ustalanie rozmiarów awarii, stwierdzenie przypadków napromienienia personelu (co oznaczało rozszczelnienie konstrukcji reaktora)
- ▶ noc – komisja rządowa rozważa czasową ewakuację osiedla Prypeć i zarządza wyłączenie pozostałych reaktorów



Awaria EJ Czarnobyl

■ 27 kwietnia (niedziela) 1986 roku

- ▶ godz. 12:00 – komunikat o ewakuacji
- ▶ godz. 14:00 – 17:00 – ewakuacja mieszkańców Prypeci
- ▶ noc – awaria osiąga wymiar katastrofy, przepalenie dachu nad halą reaktora, zawiadomienie Michaiła Gorbaczowa o konieczności nadzwyczajnej mobilizacji środków całego ZSRR oraz użycia wojska, rozpoczęcie akcji opanowywania awarii



Awaria EJ Czarnobyl

■ 28 kwietnia (poniedziałek) 1986 roku

- ▶ rano – sygnały o wzroście promieniowania (Szwecja, Polska)
- ▶ późne popołudnie – o awarii informują zachodnie media
- ▶ 20:00 – moskiewskie radio napomina o awarii

■ 29 kwietnia (wtorek) 1986 roku

- ▶ godz. 3:00 – 6:00 – posiedzenie partyjno-rządowej komisji w Warszawie
- ▶ po południu – akcja podawania płynu Lugola w Polsce, w Moskwie powołanie rządowej grupy operacyjnej
- ▶ 20:00 – radziecka telewizja wspomina o awarii w szóstej wiadomości dziennika



Awaria EJ Czarnobyl

■ 28 kwietnia – 5 maja 1986 roku

- ▶ opanowywanie awarii, z użyciem sił i środków udostępnianych w trybie nadzwyczajnym na szczęblu rządowym, zrzucone ze śmigłowców wojskowych około 5 000 ton materiałów:

węgla borku B_4C

dolomitu ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$)

gliny, piasku

ołowiu Pb

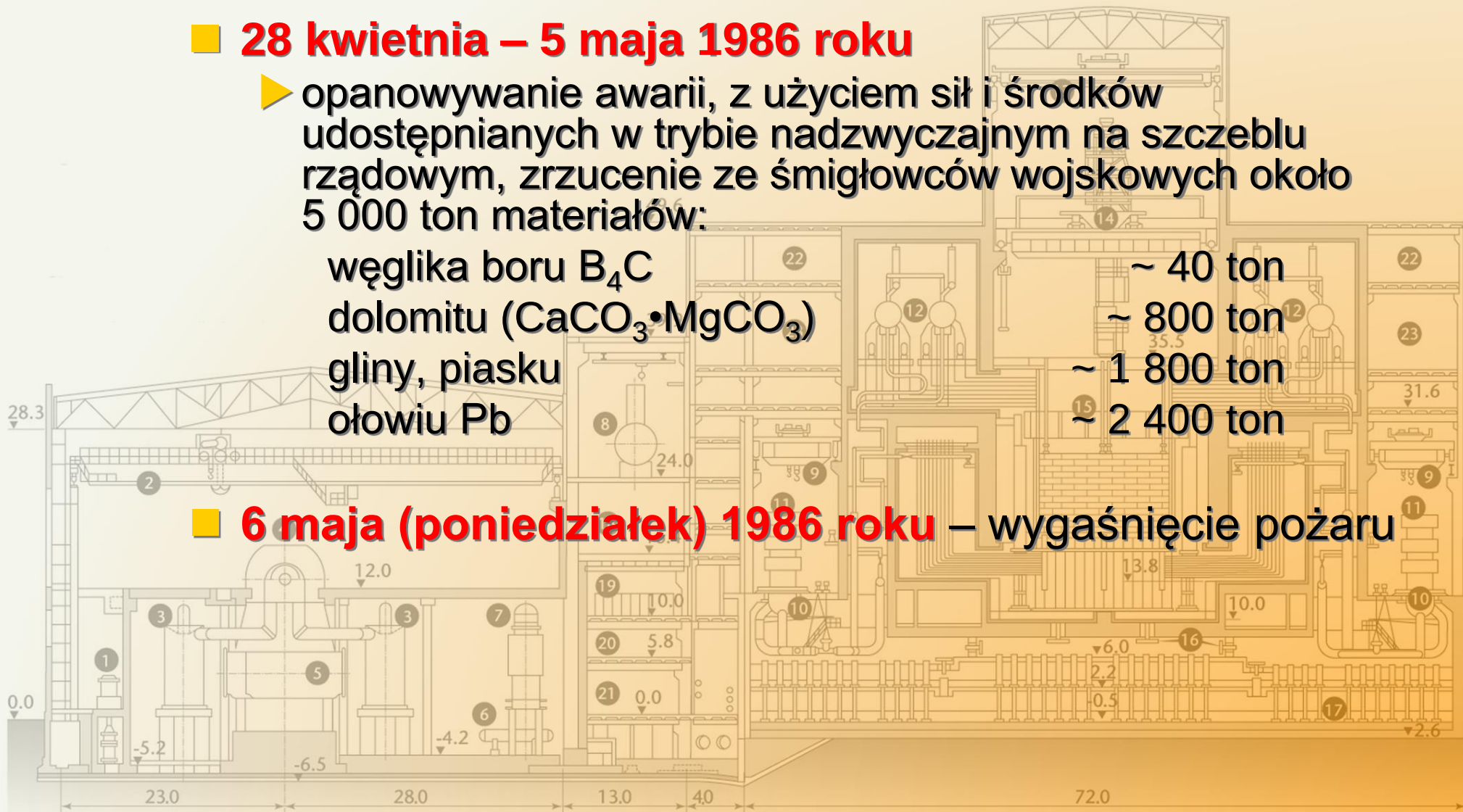
~ 40 ton

~ 800 ton

~ 1 800 ton

~ 2 400 ton

■ 6 maja (poniedziałek) 1986 roku – wygaśnięcie pożaru



Awaria EJ Czarnobyl

■ do 18 czerwca 1986 roku

▶ zrzućenie ze śmigłowców wojskowych około 11 000 ton materiałów:

dolomitu ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)

~ 400 ton

żwiru

~ 1 700 ton

ołowiu Pb

~ 4 300 ton

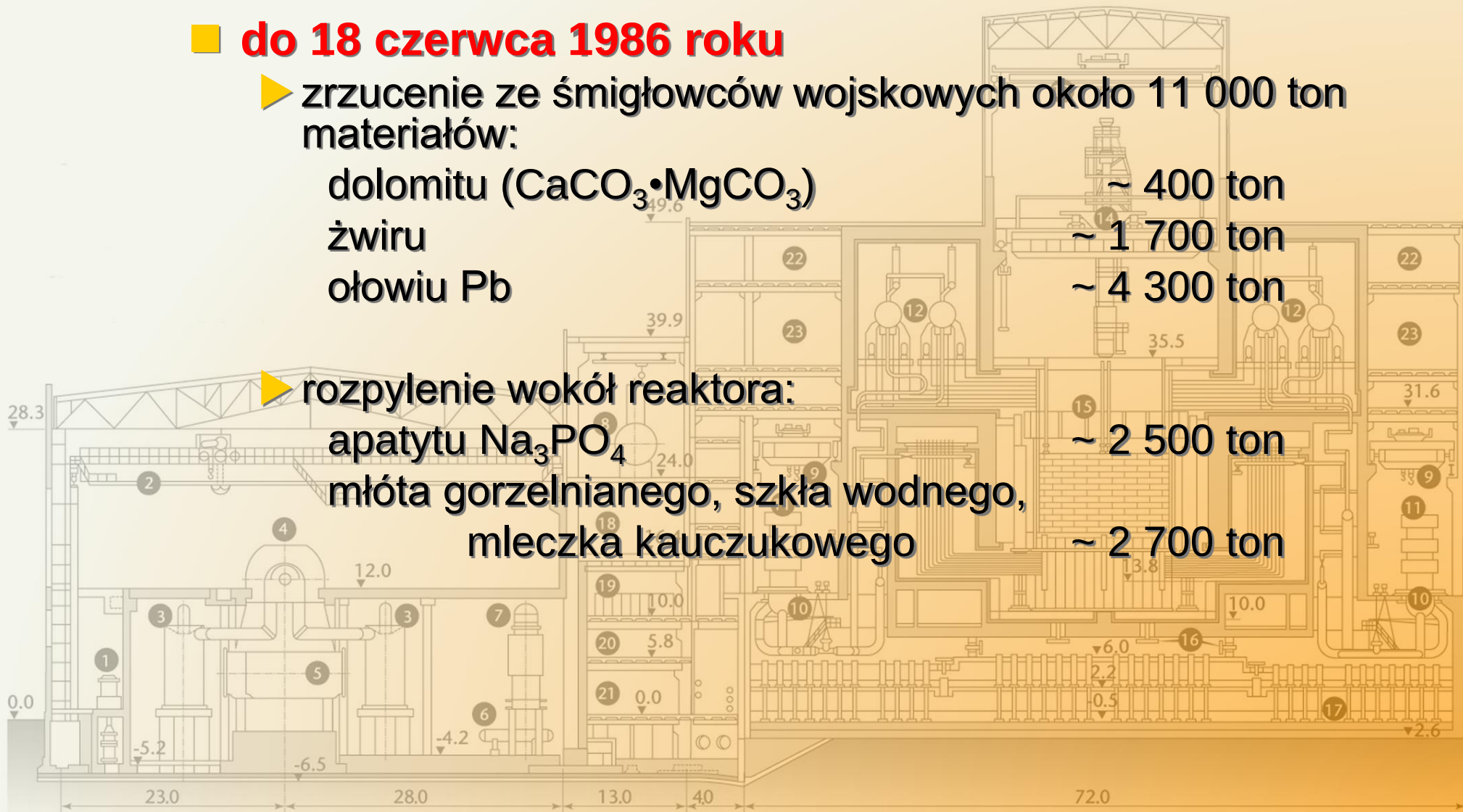
▶ rozpylenie wokół reaktora:

apatytu Na_3PO_4

~ 2 500 ton

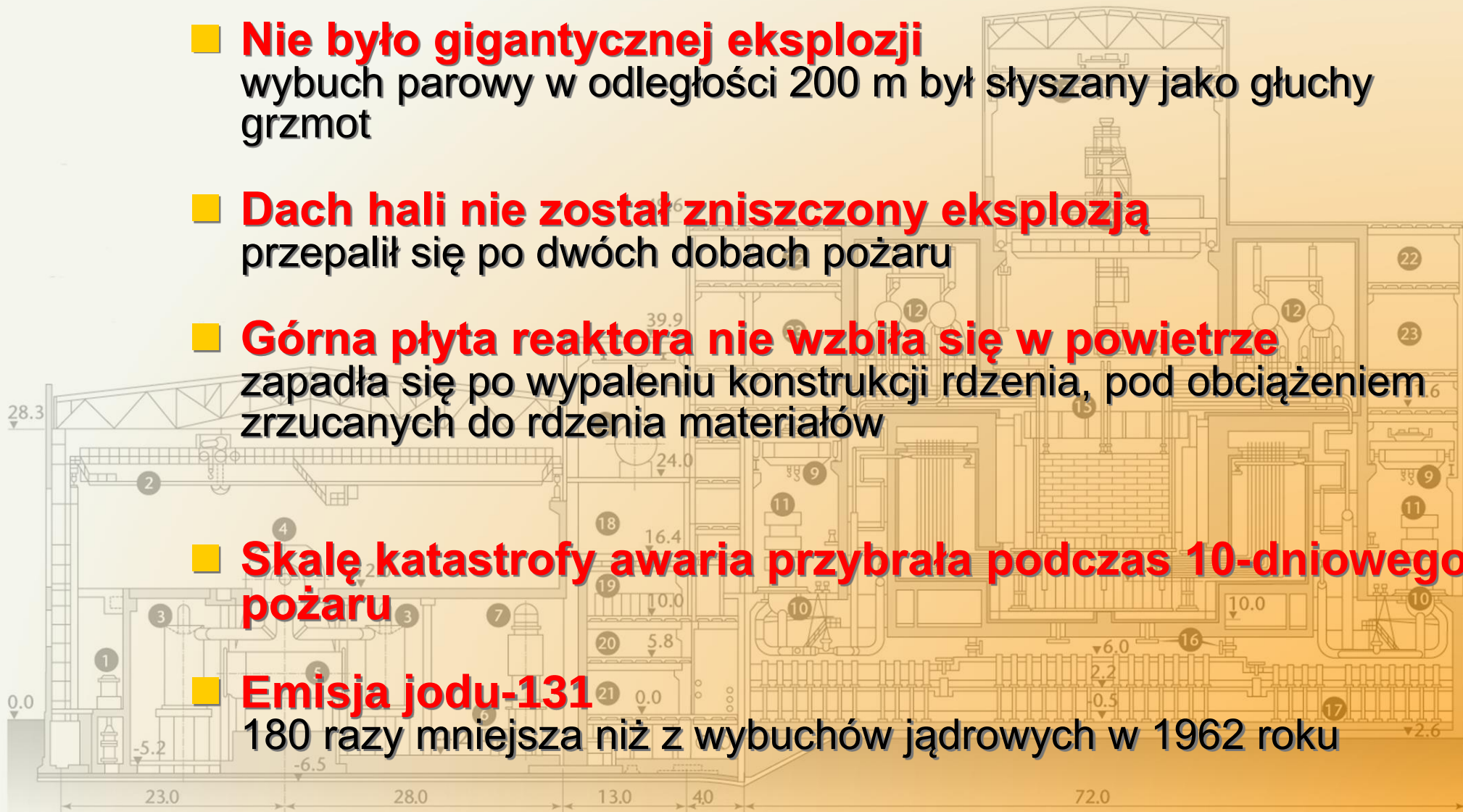
młóta gorzelnianego, szkła wodnego,
mleczka kauczukowego

~ 2 700 ton



Awaria EJ Czarnobyl

- **Nie było gigantycznej eksplozji**
wybuch parowy w odległości 200 m był słyszany jako głuchy grzmot
- **Dach hali nie został zniszczony eksplozją**
przepalił się po dwóch dobach pożaru
- **Górna płyta reaktora nie wzbiła się w powietrze**
zapadła się po wypaleniu konstrukcji rdzenia, pod obciążeniem zrzuconych do rdzenia materiałów
- **Skalę katastrofy awaria przybrała podczas 10-dniowego pożaru**
- **Emisja jodu-131**
180 razy mniejsza niż z wybuchów jądrowych w 1962 roku



Awaria EJ Czarnobyl

■ Ciepło powyłączeniowe

energia wytwarzana po wyłączeniu reaktora, w wyniku przemian jądrowych w produktach rozszczepienia wypalonego paliwa jądrowego

■ Lokalne wybuchy termiczne prętów paliwowych

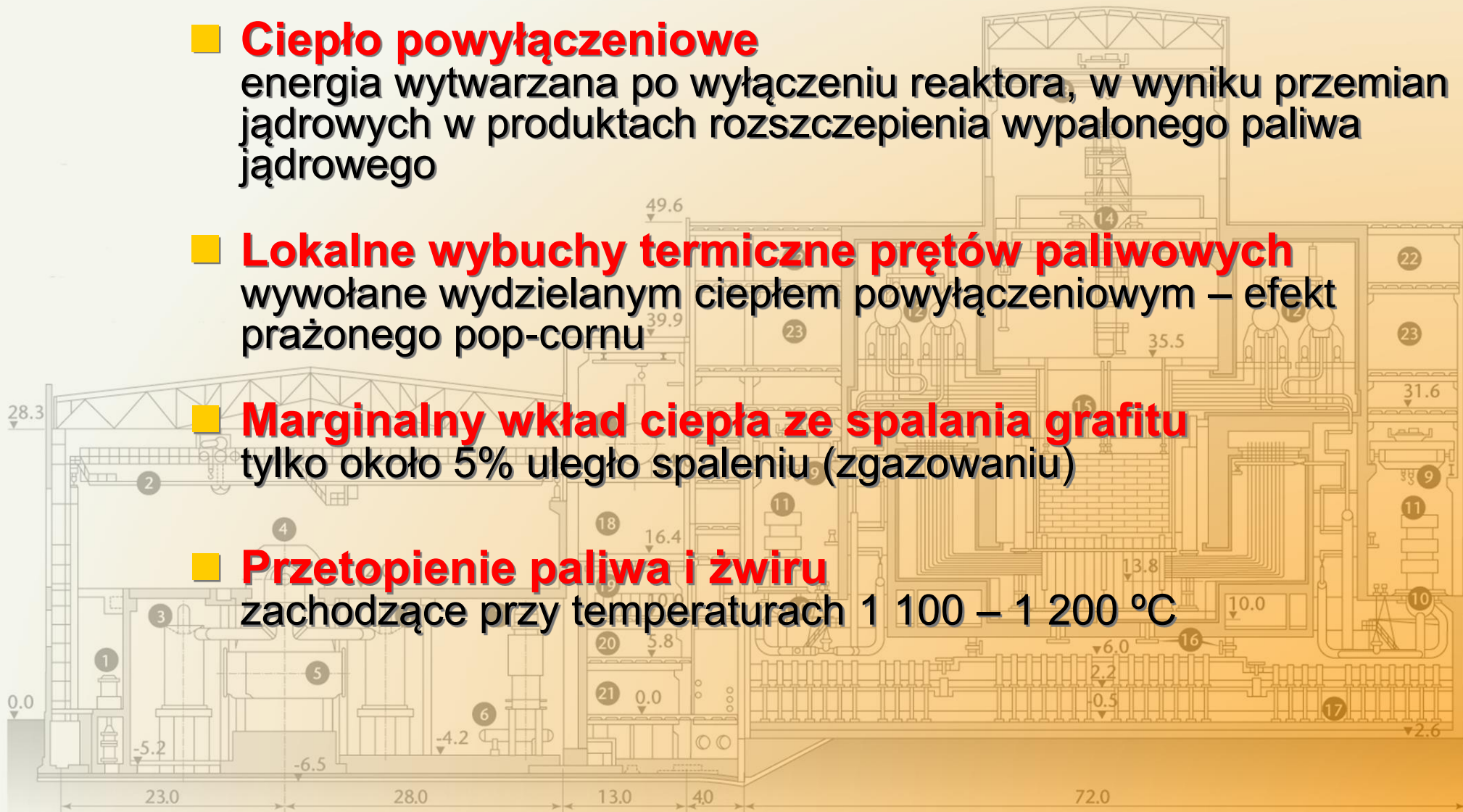
wywołane wydzielanym ciepłem powyłączeniowym – efekt prażonego pop-cornu

■ Marginalny wkład ciepła ze spalania grafitu

tylko około 5% uległo spalaniu (zgazowaniu)

■ Przetopienie paliwa i żwiru

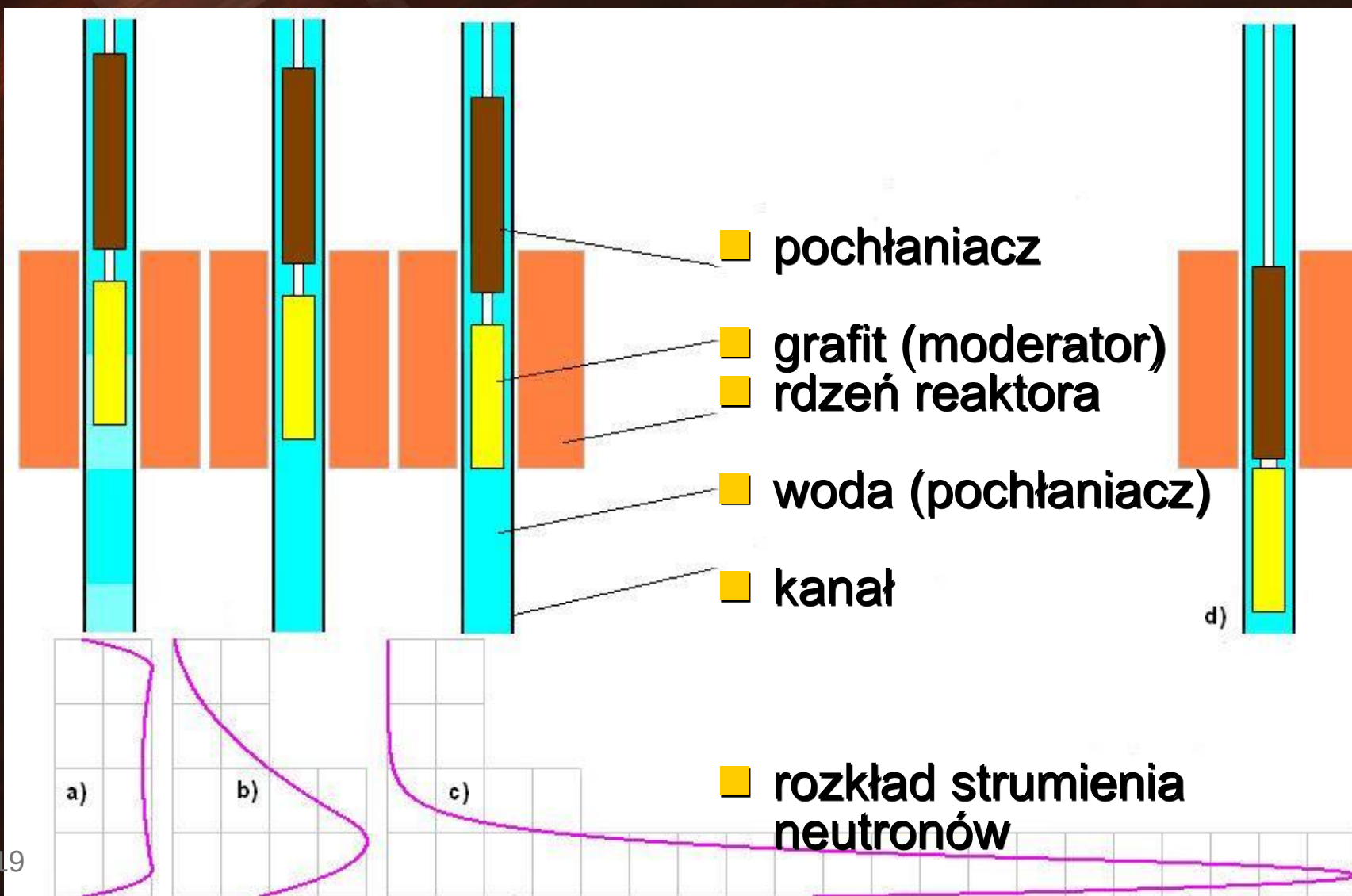
zachodzące przy temperaturach 1 100 – 1 200 °C



Przyczyna awarii – *positive scram*

- Półtora roku po awarii amerykańscy i kanadyjscy naukowcy podali wytłumaczenie przyczyny awarii – efekt chwilowego wzrostu mocy reaktora RBMK w momencie zrzutu prętów sterujących
- Efekt ten mógł powstawać po całkowitym wycofaniu prętów z rdzenia reaktora
- Wywołany był umieszczeniem grafitowych moderatorów na końcach prętów pochłaniających neutrony
- Wprowadzenie w obszar rdzenia moderatora w miejsce wody (pochłaniającej neutrony) powodowało wzrost mocy reaktora
- Efekt porównywany jest z działaniem hamulca, który w pierwszym momencie powoduje przyspieszenie

Przyczyna awarii – *positive scram*



to nie Czarnobyl

to wirtualna fikcja



■ dziękuję za uwagę

Praktyki studenckie w Strefie

- Istnieje możliwość zorganizowania w Czarnobylskiej Strefie Wykluczenia 3-tygodniowych praktyk studenckich i/lub wyjazdów dla specjalistów
- Dotychczas zostało zorganizowanych kilka takich wizyt naukowych
- Organizator: Polskie Towarzystwo Nukleoniczne i strefazero.org

Praktyki studenckie w Strefie



Praktyki studenckie w Strefie

2018-04-19