

# Pokročilé technologie spalování tuhých paliv

## Možnosti zvyšování účinnosti parních kotlů

1

Může zvyšování obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší změnit  
životní podmínky na Zemi?

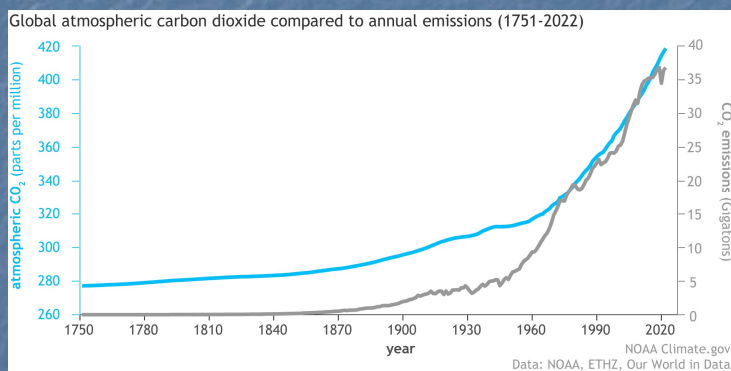
- otázka je komplexní a velmi složitá, nicméně  
pravděpodobně správná odpověď zní ANO

Lépe by bylo se ptát

- jak lidská činnost přispívá k produkci CO<sub>2</sub>  
resp. GHE
- jak se projeví dekarbonizační opatření  
plánovaná EU na celkovém snížení GHE

## Může zvyšování obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

- je jisté, že množství CO<sub>2</sub> vypouštěného ze spalovacích procesů do atmosféry roste



- jednoznačné spojení s rostoucí koncentrací CO<sub>2</sub> v atmosféře a oteplováním klimatu je však zjednodušené

## Může zvyšování obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

### Celková bilance produkce CO<sub>2</sub>

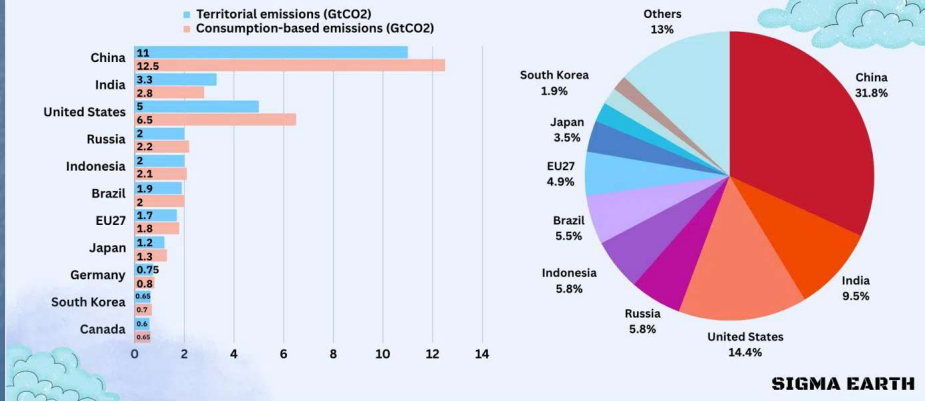
- oceány 54,9 %
- lesy 41,5 %
- lidská činnost 3,6 %

### Podíl na GHE

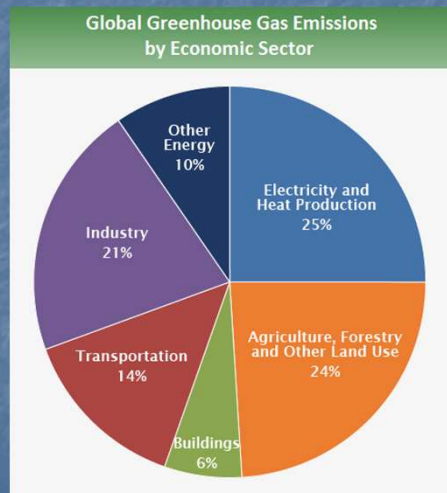
- vodní pára 60 %
- CO<sub>2</sub> 20 %
- metan 7,2 %
- další plyny (freony,...) 5,6 %

Může zvyšování obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

### Country-by-Country Breakdown of Global Carbon Emissions for 2023



Může zvyšování obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?



## Může zvyšování obsahu CO<sub>2</sub> v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

### Globální bilance

■ celková emise GHG	100 %
■ z toho CO <sub>2</sub> z lidské činnosti	16 %
■ z toho Kyotský protokol pokrývá 45 %	7,2 %
■ z toho emise EU představují 23,75 %	1,71 %
■ z toho trh EU ETS pokrývá 50 % emisí	0,86 %
■ cíl k roku 2030 je snížení o 55 %	0,47 %

### Za jakou cenu?

zdroj: Pravda capital partners AG

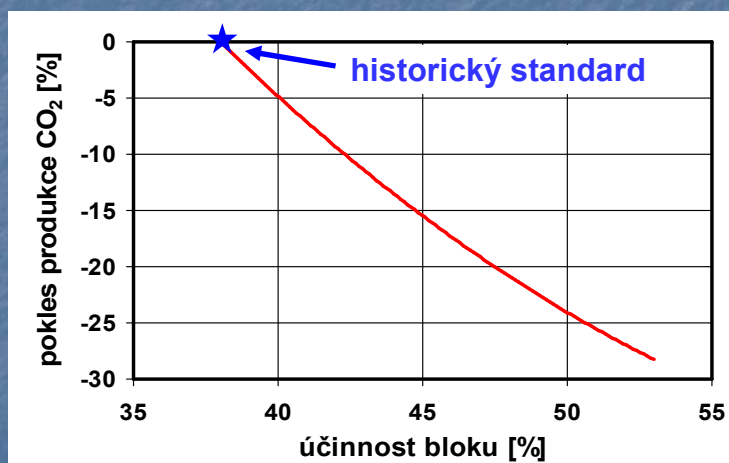
## V celosvětovém měřítku uhlí v energetice nekončí

Stát	počet jednotek			instalovaný výkon (MW)		
	plánováno	ve výstavbě	v provozu	plánováno	ve výstavbě	v provozu
China	212	189	2955	106176	99710	1004948
India	43	56	871	29327	36698	228964
United States	0	0	561	0	0	246187
Russia	9	2	345	4945	120	46862
Indonesia	99	44	171	19360	11840	32373
Poland	1	4	166	500	2470	30870
Japan	5	16	134	2612	9269	46682
Germany	1	1	116	920	1100	44470
Ukraine	2	0	107	660	0	22265
South Africa	7	6	106	6280	4770	41435
Kazakhstan	0	1	91	0	636	12704
South Korea	0	7	83	0	7260	37600
Czech Republic	2	1	79	180	660	8517
Turkey	50	3	75	31715	1465	19514
Vietnam	51	16	63	22262	8680	18432
Australia	4	0	58	2980	0	24382

## V celosvětovém měřítku uhlí v energetice nekončí

	Subcritical	Supercritical	Ultra-super	celkem (MW)
plánováno	22325	64863	123374	210562
ve výstavbě	9239	72395	103069	184703
v provozu	1172623	516851	304503	1993977
celkem	1204187	654109	530946	2389242
plánováno	11%	31%	59%	100%
ve výstavbě	5%	39%	56%	100%
v provozu	59%	26%	15%	100%
celkem	50%	27%	22%	100%

## Vliv účinnosti uhelného bloku na produkci CO<sub>2</sub>



## Účinnost bloku uhelné parní elektrárny

$$\eta_{netto} = \eta_o \cdot \eta_k \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{vs}$$

kde je

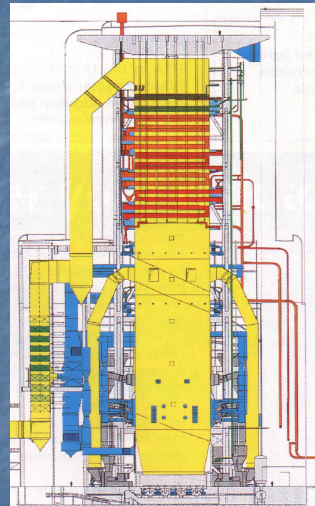
$\eta_o$	účinnost reálného tepelného oběhu
$\eta_k$	účinnost kotle
$\eta_p$	účinnost parovodů
$\eta_m$	mechanická účinnost turbíny
$\eta_g$	účinnost generátoru
$\eta_{tr}$	účinnost transformace
$\eta_{vs}$	respektování vlastní spotřeby

11

## Účinnost kotle

je dána pěti ztrátami :

- ztrátou fyzickým teplem spalin (komínovou),
- ztrátou hořlavinou v TZ
- ztrátou hořlavinou ve spalinách
- ztrátou fyzickým teplem TZ
- ztrátou sdílením tepla do okolí



12

## Velikost ztrát závisí :

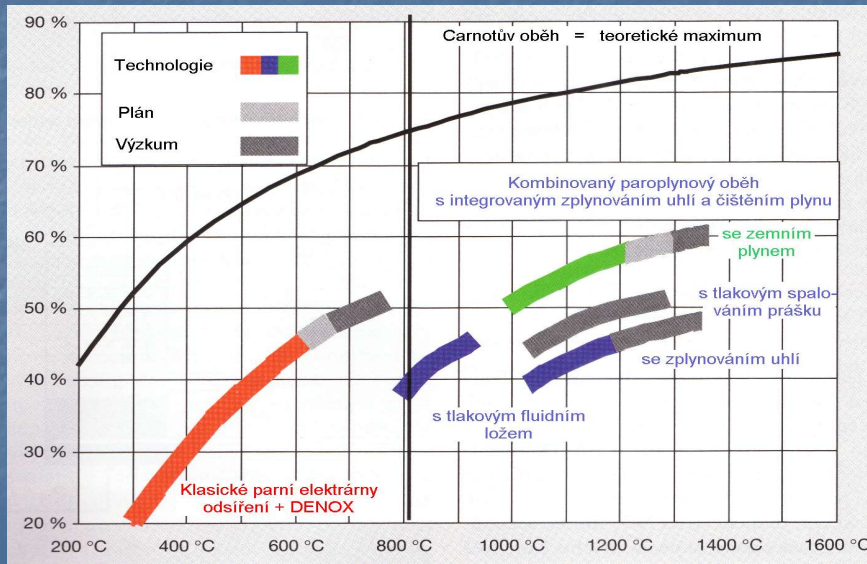
- na konstrukčním řešení spalovacího zařízení
- na konstrukčním řešení kotle
  - na velikosti koncových výhřevných ploch
    - ohříváku vody (EKO)
    - ohříváku vzduchu (OVZ)
  - na podmínkách přestupu tepla
- na vlastnostech uhlí – obsahu vody a popela

13

## Vývojové trendy, nové systémy

14

## Účinnost technologií na bázi využití uhlí



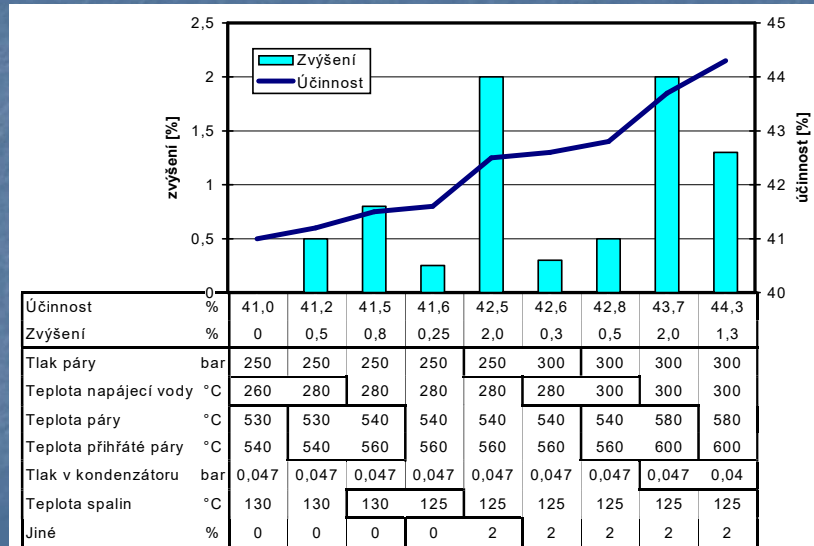
## Klasické parní elektrárny

Pro zvyšování účinnosti se u tradiční osvědčené technologie parního oběhu používají všechna karnotizační opatření:

- intenzifikace parametrů
  - admisních - zvyšování tlaku a teploty
  - emisních - snižování protitlaku
- opakované přehřívání páry
- regenerační ohřev napájecí vody



## Způsoby zlepšení účinnosti elektráren



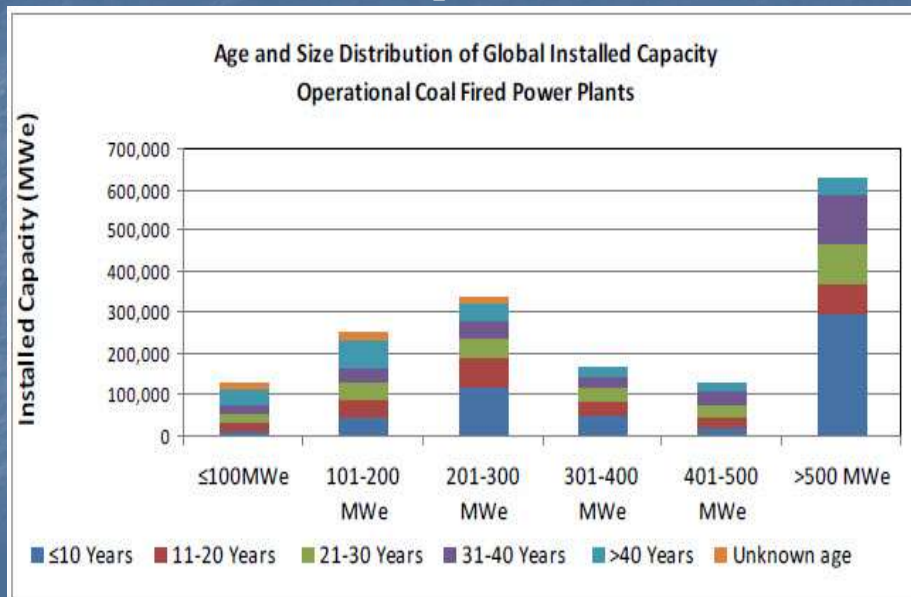
7

## Parametry admisní páry

- **Standard** - starší podkritické i nadkritické bloky s průměrnou čistou účinností v Evropě  $\eta_{\text{netto}}=0.38$ .
- **Stávající špička** „Generace 600“ s tlakem kolem 30MPa, dvojnásobným mezipřehřátím a teplotami ostré páry i přehřátých par až do hodnot těsně nad 600°C. V závislosti na ostatních parametrech se čistá účinnost pochopitelně mění, ale dosaženy byly hodnoty až  $\eta_{\text{netto}}=0.50$  - pro zemní plyn a 0.47 - pro uhlí. (Mezní parametry této generace jsou patrně 33MPa/610°C)
- **Aktuální vývoj** „Generace 700“ (AD700 Project – 1998 - 2016) s tlakem do 35-37.5 MPa, maximálními teplotami páry 700-720°C a čistou účinností až  $\eta_{\text{netto}}=0.54$ .
- **Výhled** směřovaný na období po roce 2020 „Generace 800“ s maximální teplotou páry v oblasti 800°C a čistou účinností vyšší než  $\eta_{\text{netto}}=0.55$ .

18

## Práškové spalování uhlí



## Práškové spalování uhlí

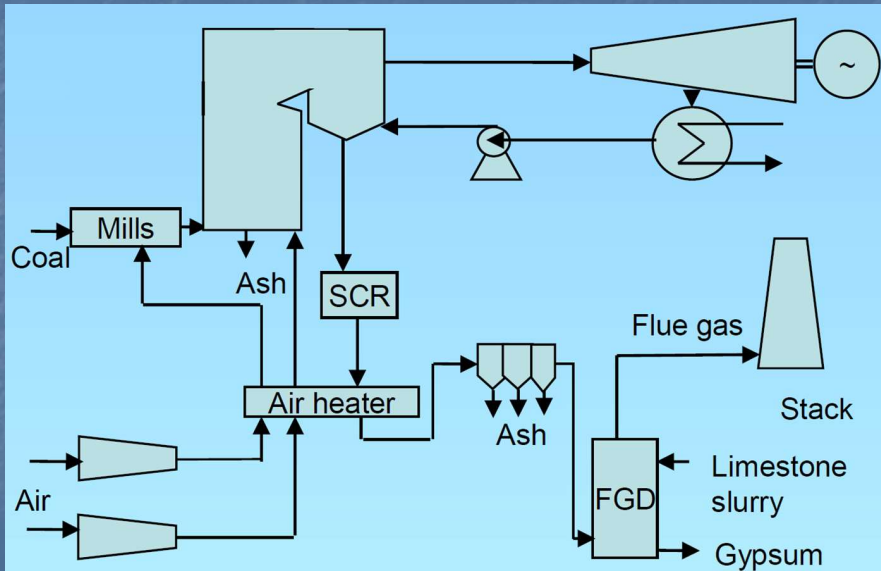
- instalovány stovky GWe, jednotky až ~ 1100 MW
- účinnost 43 – 48 % v nejlepších jednotkách
- klasické metody pro snižování emisí dobře zvládnuty

### Výhled:

- bude stále nejrozšířenější uhelnou technologií
- vývoj pokročilých metod omezování emisí včetně suchých systémů
- extenzivní zlepšování účinnosti
- další zvýšení účinnosti
  - pokročilým sušením HU
  - přechodem na 35 MPa / 700 ° C páry ( $\eta > 50\%$ )

20

## Práškové spalování uhlí



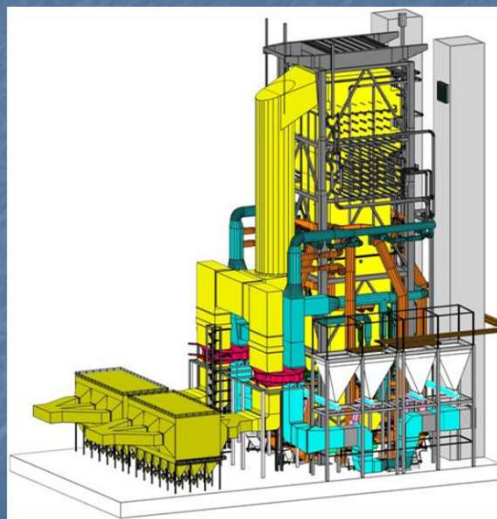
## Nejnovější realizace na HU

### BoA 2&3 Neurath

do provozu 2013  
 palivo HU  
 čistý výkon 2x1050 MW  
 čistá účinnost > 43 %

### kotel

věžový, průtočný  
 parní výkon 800 kg/s  
 tepelný výkon 2392 MW  
 spotřeba uhlí 820 t/h  
 ostrá pára 272 bar/600°C  
 přehřátá pára 55 bar/605°C  
 hmotnost 51500 t



22

# Nejlepší světové realizace

## Pingshan 2, Čína

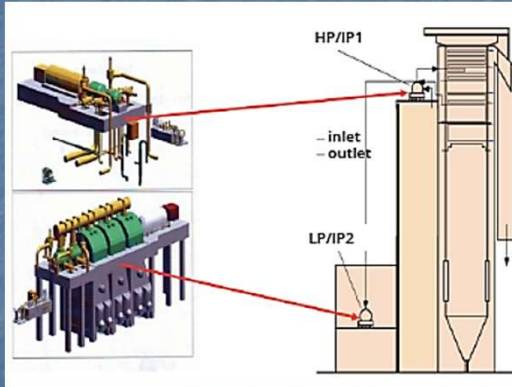
národní demonstrační projekt  
do provozu 2022



palivo ČU  
čistý výkon 1350 MW  
čistá účinnost 49,8 %

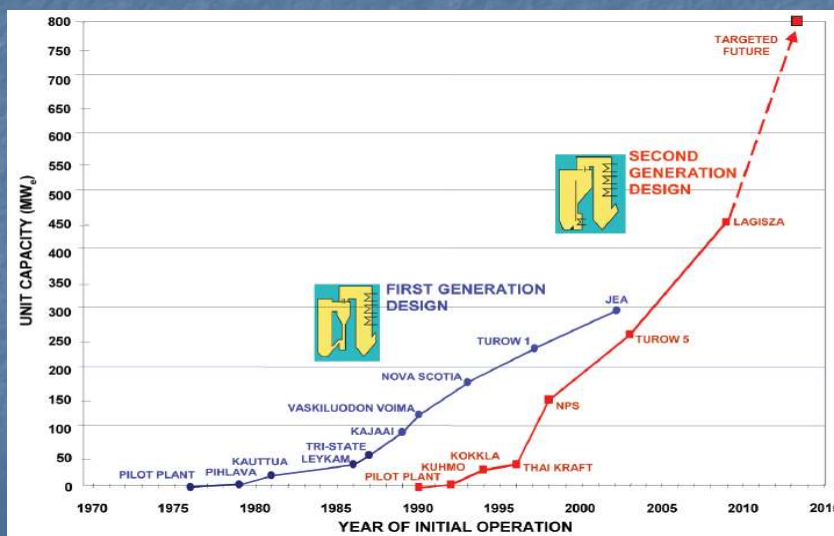
### kotel

věžový, průtočný  
ostrá pára 325 bar/610°C  
1. přehřívání 96,5 bar/630°C  
2. přehřívání 22,9 bar/623°C



23

# Nejlepší světové reference fluidní kotle



24

## Spalování uhlí v cirkulující fluidní vrstvě

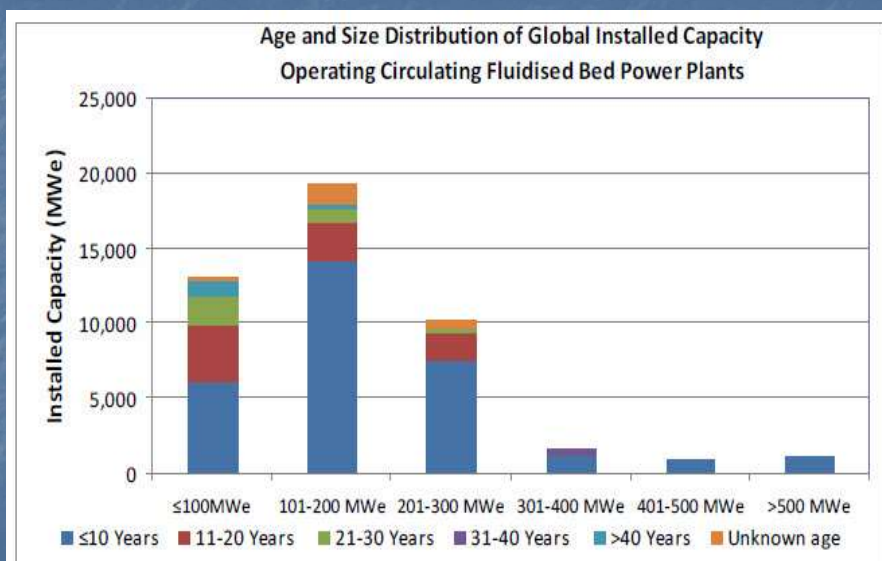
- instalovány stovky jednotek – výkony ve stovkách MWe
- vhodné pro uhlí nízké kvality a jiná paliva
- klasické metody pro snižování emisí dobře zvládnuty
- výhodou nízké emise  $\text{NO}_x$  a možnost aditivního odsiřování

Výhled:

- bude stále důležité pro méně kvalitní uhlí, **biomasu a odpady**
- rostoucí počet instalací v průmyslových zdrojích
- další zvýšení účinnosti – přechod na SC parametry

25

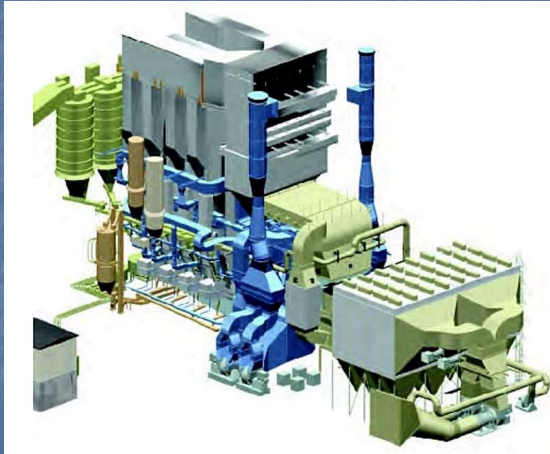
## Spalování uhlí v cirkulující fluidní vrstvě



26

## Nejlepší světové reference

### Lagisza, Polsko 460 MWe



Instalovaný výkon 460 MWe

#### Parametry přehřáté páry

- průtok 360 kg/s
- teplota 560 °C
- tlak 27.5 MPa

#### Parametry přehřáté páry

- průtok 307 kg/s
- teplota 580 °C
- tlak 5.46 MPa

Účinnost (hrubá) ~ 43%

Uvedení do provozu 2007

27

## Nejlepší světové reference

### Baima, Čína 600 MWe

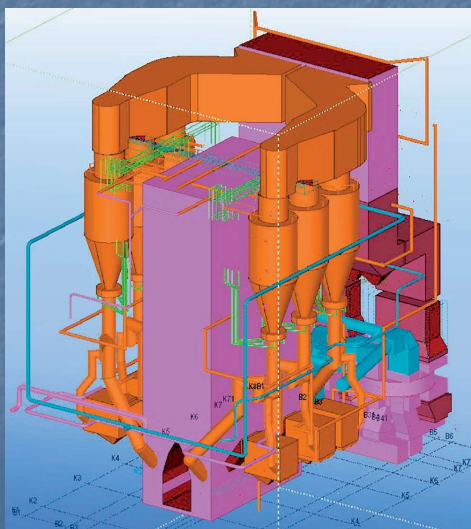


TABLE 1. Design parameters of the 600-MW<sub>e</sub> SC CFB boiler

Design Parameter	Units	Value
Steam Output	tonnes/hr	1900
Main Steam Pressure	MPa	25.4
Main Steam Temperature	°C	571
Reheat Steam Flow Rate	tonnes/hr	1553
Inlet/Outlet Pressure of Reheated Steam	MPa (absolute)	4.58/4.43
Inlet/Outlet Temp. of Reheated Steam	°C	317/569
Feeding Water Temp.	°C	284
SO <sub>x</sub> emission	mg/Nm <sup>3</sup>	<380
NO <sub>x</sub> emission	mg/Nm <sup>3</sup>	<200

28

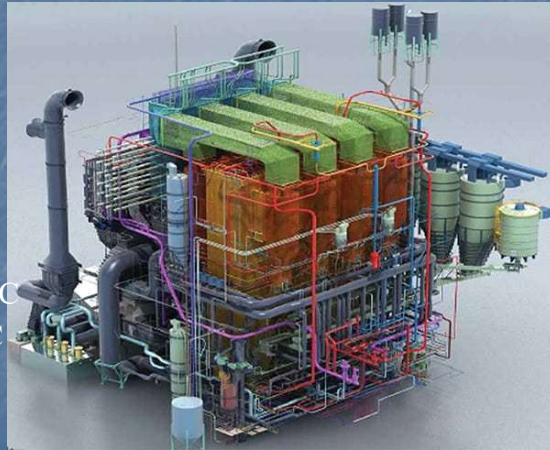
## Nejlepší světové reference

### Samcheok, Jižní Korea 1000 MWe

do provozu 2017  
palivo lignit  
čistý výkon 2x1000 MW  
čistá účinnost 42,4 %

#### kotel

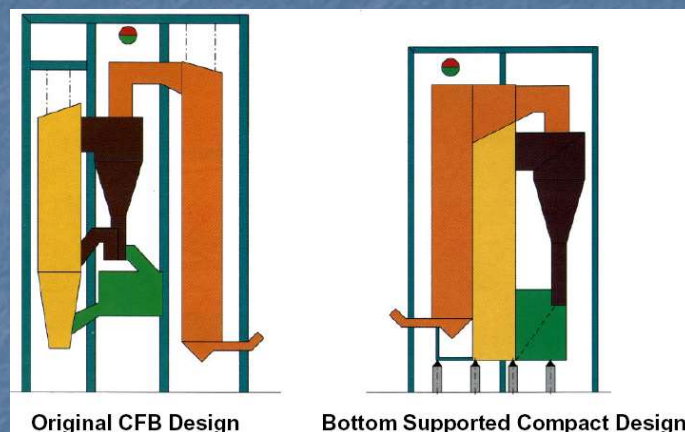
FW koncept, průtočný  
parní výkon 436 kg/s  
ostrá pára 257 bar/603°C  
přihřátá pára 54 bar/603°C  
nap. voda 297 °C



29

## Vývojové trendy fluidních kotlů

### vývoj kompaktního fluidního kotle (Lurgi)

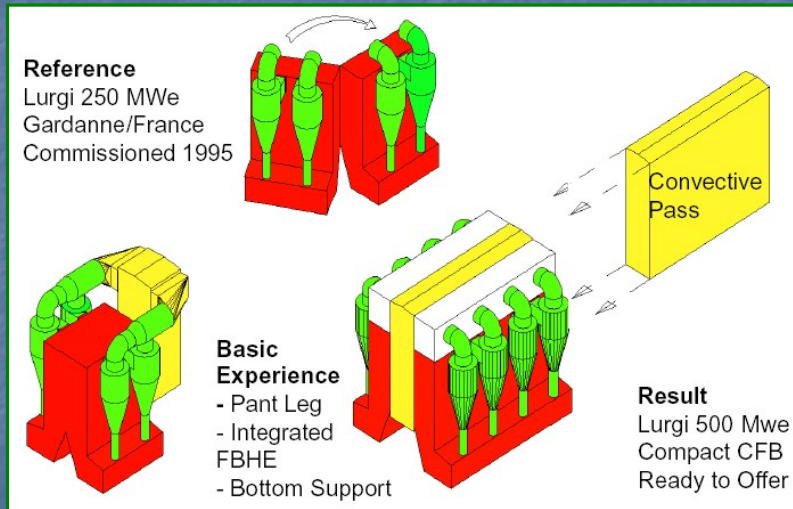


- zaujímá 70% objemu klasického řešení
- pro výkony až 500 MWe

30

## Vývojové trendy fluidních kotlů

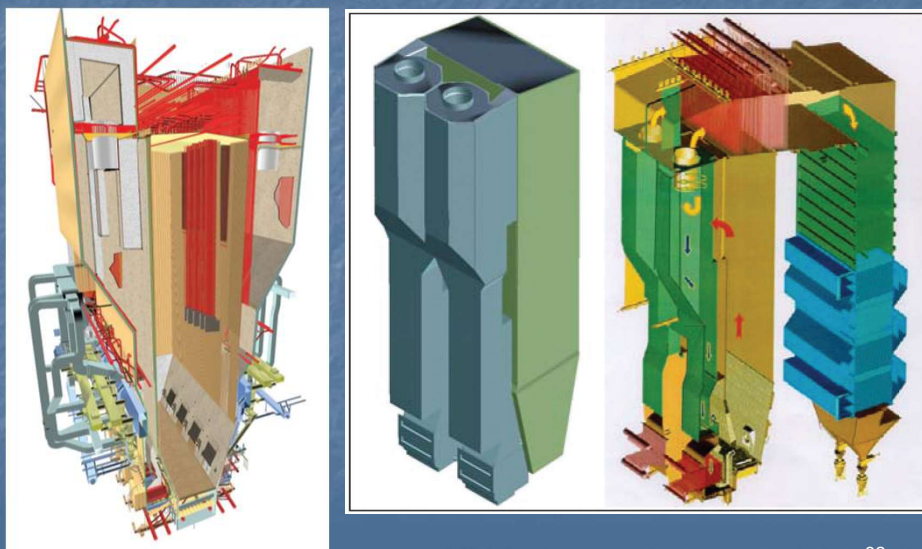
### vývoj kompaktního fluidního kotle (Lurgi)



31

## Vývojové trendy fluidních kotlů

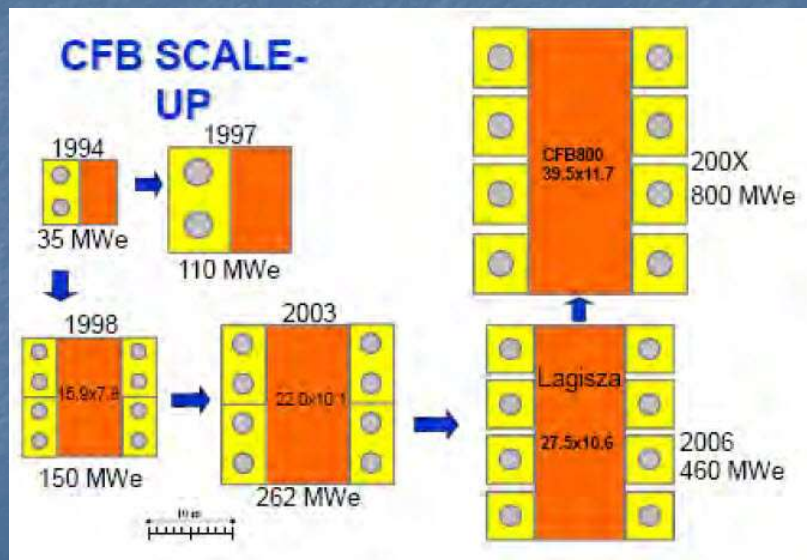
### vývoj kompaktního fluidního kotle (Foster Wheeler)



32

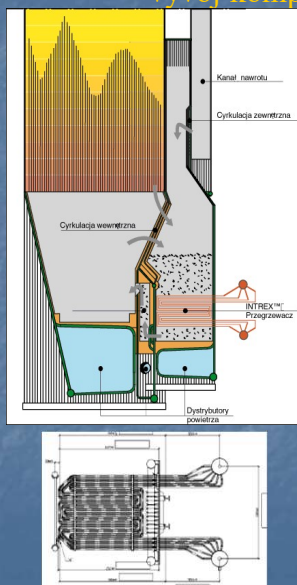


## Vývojové trendy fluidních kotlů zvyšování kapacity kompaktních ohnišť

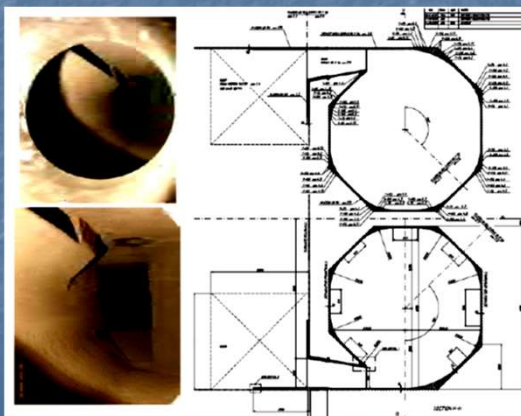


33

## Vývojové trendy fluidních kotlů vývoj kompaktního fluidního kotle (Foster Wheeler)



- INTREX – výstupní přehřívák umístěný do materiálu fluidní vrstvy
- chlazený kompaktní odlučovač



34

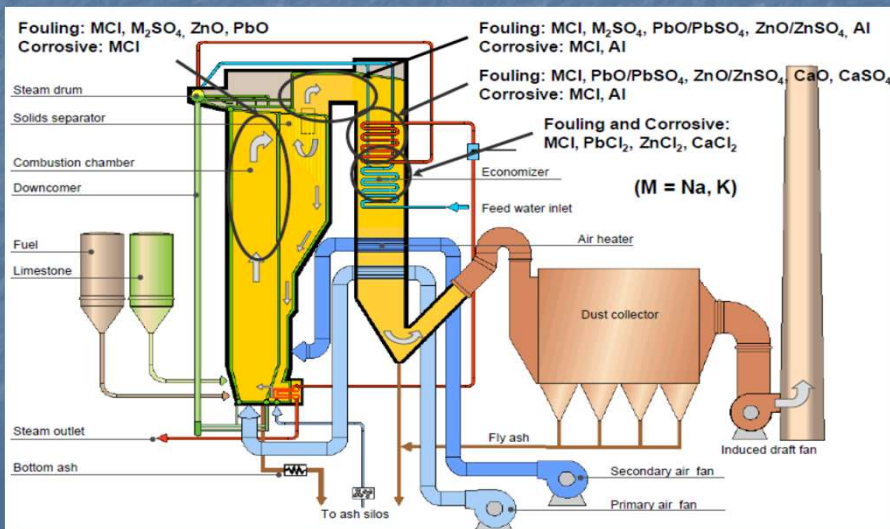
## Vývojové trendy fluidních kotlů modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

- problémy souvisejí s přítomností **chloru a alkalických příměsí** v palivu
- chlor je vázán
  - v TAP v plastech (PVC) a anorganických alkalických chloridech ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ )
  - v agrární biomase (slámě) zejména ve formě  $\text{KCl}$  původem z umělých hnojiv
- chloridy alkalických kovů se během spalování odpaří, pak kondenzují v oblasti teplot 650 až 800 °C na povrchu přehříváků – tím vznikají rychle rostoucí nánosy
- chlor v kotli způsobuje vysokoteplotní chlorovou korozi
  - v oblasti spalovací komory – do procesu se zapojují roztavené soli alkalických chloridů a síranů - vznikají reakce mezi plynnými produkty spalování  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  s oxidy  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$
  - v oblasti přehříváků – pod povrchem alkalických nánosů vzniká cyklický korozní mechanismus s  $\text{FeCl}$
- při spalování paliv se zvýšeným podílem Cl je třeba aplikovat opatření pro snížení rizika chlorové koroze a zanášení kotle
- spalování dřevní štěpky, která chlor neobsahuje, nevyžaduje specifické úpravy spalovacího zařízení a tlakového celku fluidního kotle

35

## Vývojové trendy fluidních kotlů modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

Výskyt usazenin a korozně agresivních látek v kotli při spalování biomasy a odpadu



## Vývojové trendy fluidních kotlů

### modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

Opatření, která by mohla působení negativní působení Cl na kotel omezit, lze rozdělit do tří kategorií:

- konstrukční
  - výběr vhodného materiálu, který by méně trpěl korozním napadením
  - opatření materiálu antikorozi povrchovou ochranou – keramika, cladding
- projekční – jedná se o umístění přehříváků do oblastí s nižší teplotou spalin
  - za spalovací komoru zařadit alespoň jeden volný tah pro dochlazení spalin pod 700 °C
  - výstupní přehřívák umístit do materiálu fluidního lože,
- provozní – použitím různých aditiv převážně na bázi síranů nebo fosforečnanů, které dokáží nežádoucí látky vázat

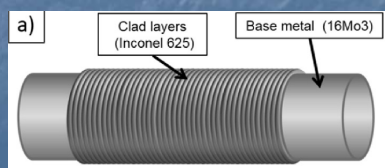
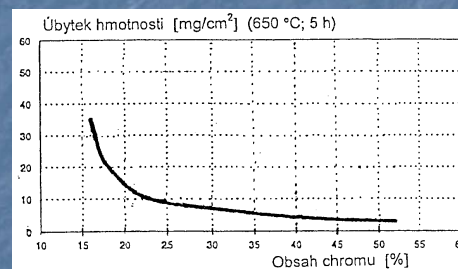
37

## Vývojové trendy fluidních kotlů

### modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

#### Použití vhodné oceli

- běžně užívané oceli třídy 12 a 15 nemají dostatečnou odolnost proti chlorové korozi
- korozní odolnost lze zvýšit legováním chromem nad 15 % = užití austenitů
- ve vysoce exponovaných místech lze provést povrchový návar (cladding) materiálem Inconel 625 na bázi 58 % Ni a 23 % Cr



38

## Vývojové trendy fluidních kotlů

### modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

Komplexní projekční řešení - kotel elektrárny Soderenergi, Igelsta - Švédsko

- parní výkon 330 t/h
- teplota páry 540 °C
- tlak páry 90 bar
- palivo štěpka 75 %, TAP 25 %  $Cl^d = 0,12 \%$ ,  $N^d = 0,6 \%$ ,  $S^r = 0,05 \%$ ,
- elektrický výkon 85 MW<sub>el</sub>
- tepelný výkon 240 MW

Aby nedošlo k zanášení a korozi, kotel má:

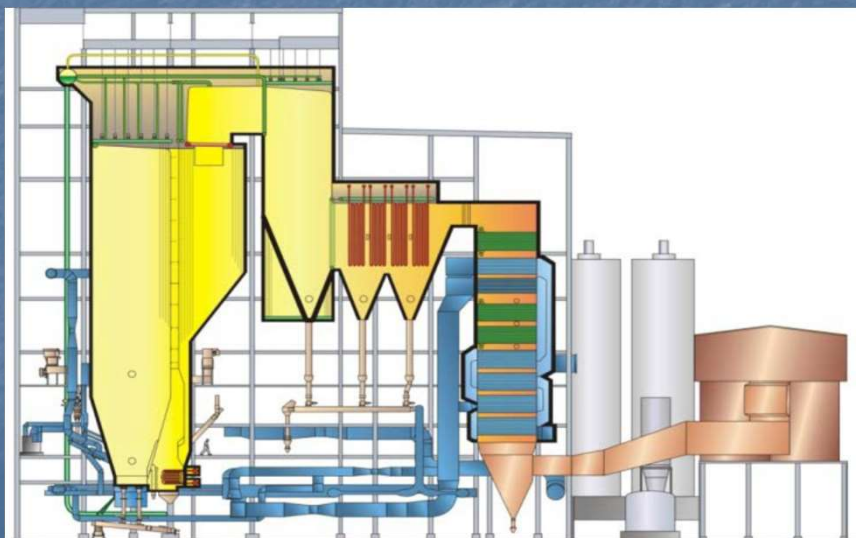
- koncový přehřívač umístěný v recirkulovaném fluidizačním materiálu
- prázdný tah pro prodloužení doby zdržení spalin, aby se ochladily a vyčistily před vstupem do konvektivních přehřívačů
- vodní ostřikovače na bocích prázdného tahu pro čištění jeho stěn a pružinová kladiva pro oklepávání usazenin z konvektivních přehřívačů
- dávkování sírových granulí pro zvýšení teploty tavení popílků
- závěsné austenitické přehřívačky, které lze snadno vyměnit střechou

39

## Vývojové trendy fluidních kotlů

### modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

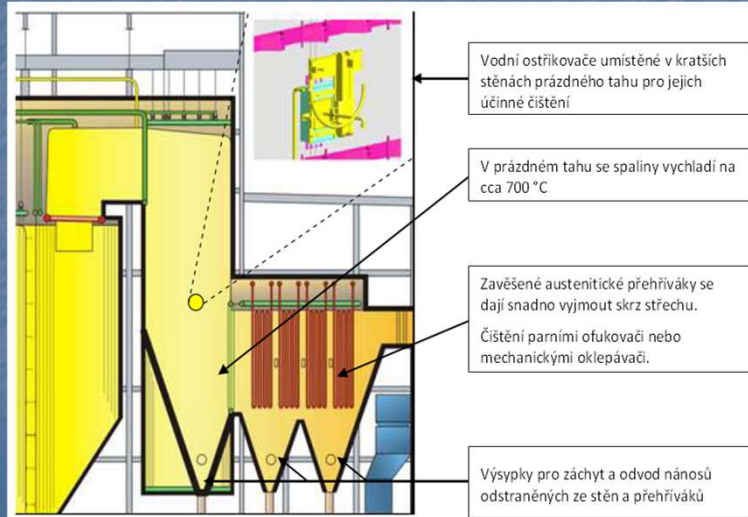
kotel elektrárny Soderenergi, Igelsta



## Vývojové trendy fluidních kotlů

### modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

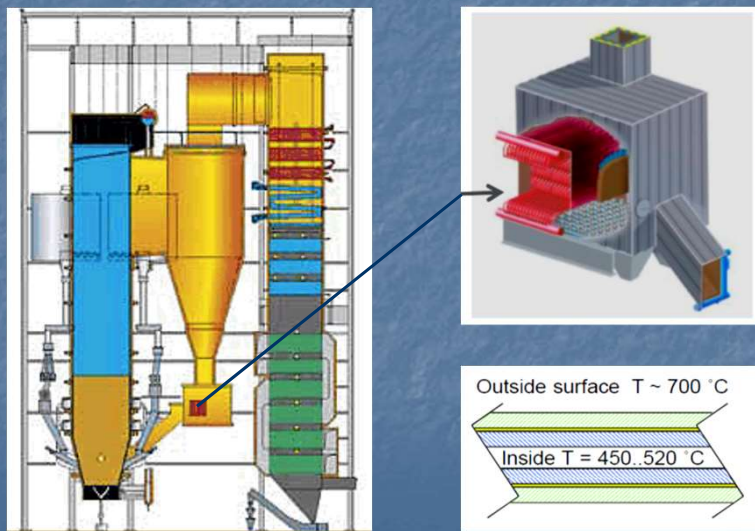
opatření aplikovaná pro omezení zanášení a koroze výhřevných ploch



## Vývojové trendy fluidních kotlů

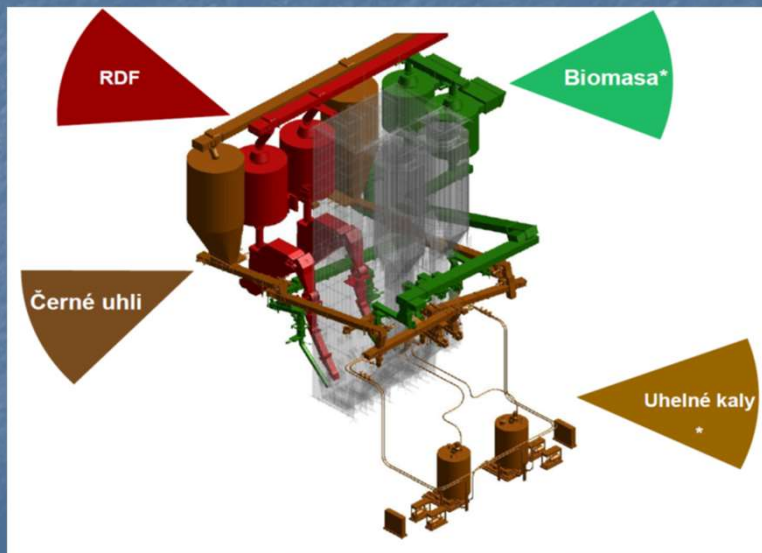
### modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

výstupní přehřívák umístěný do recirkulovaného materiálu fluidního lože



## Vývojové trendy fluidních kotlů

zvládnutí multipalivového programu - CFB kotel Zabrze (Polsko)



43

## Materiály pro superkritické parametry páry

### Ocel P91 (17 119)

- dnes standardní konstrukční materiál
- přípouští parametry páry 27 MPa, 580/600 °C.
- feriticko martenzitická ocel na bázi 0,1C 9Cr 1Mo V Nb N,

Základní vlastnosti oceli P91 lze shrnout následovně:

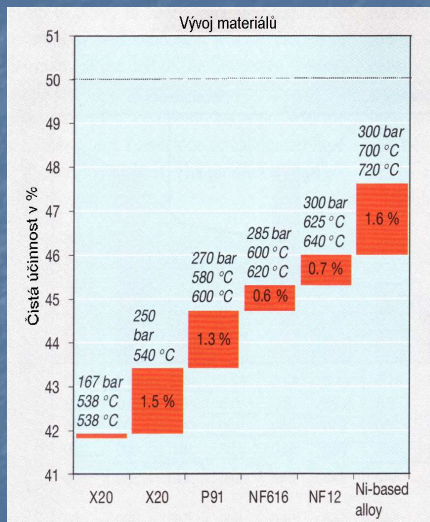
- vysoká žárupevnost a plasticita při creepu
- zvýšená korozní odolnost v prostředí vodíku, vodní páry a zplodin hoření
- vysoká tepelná vodivost
- nízká teplotní roztažnost
- dobré technologické vlastnosti vč. svařitelnosti
- nízká cena

44

## Materiály pro superkritické parametry páry

Dalšího zvýšení žárupevnosti bylo dosaženo

- přidáním W:
  - japonské materiály označované jako NF616
  - evropským ekvivalentem je E911
- legováním Co, který brání zachování delta-feritu v mikrostruktuře
  - NF12 (~12%Cr, ~2.5%W a ~2.5%Co)
  - pro parametry 30 MPa, 625/640°C.
- vývoj superslitin na bázi niklu, které by umožnily docílit podstatně vyšších parametrů páry (720 °C a více než 30 MPa).



45

## Nové materiály pro vysoké parametry páry

Prvek		P 91	E911	NF616	HCM12A	TB 12M
C		0.08-0.12	0.10-0.13	0.07-0.13	0.07-0.14	0.10-0.15
Mn		0.30-0.60	0.30-0.60	0.30-0.60	≤0.70	0.40-0.60
Si		0.20-0.50	0.10-0.30	≤0.50	≤0.50	0.50 max
S		0.010 max	0.010 max	0.010 max	≤0.010	0.010 max
P		0.020 max	0.020 max	≤0.020	≤0.020	0.020 max
Cr		8.00-9.50	8.50-9.50	8.50-9.50	10.00-12.50	11.0-11.30
Mo		0.85-1.05	0.90-1.10	0.30-0.60	0.25-0.60	0.40-0.60
W		-	0.90-1.10	1.50-2.00	1.50-2.50	1.60-1.90
Ni		0.40 max	0.20-0.40	≤0.40	≤0.50	0.70-1.0
Cu		-	-	-	0.30-1.70	-
V		0.18-0.25	0.15-0.25	0.15-0.25	0.15-0.30	0.15-0.25
Nb		0.06-0.10	0.06-0.10	0.04-0.09	0.09-0.10	0.04-0.09
N		0.030-0.070	0.050-0.080	0.030-0.070	0.040-0.100	0.04-0.09
Al		0.04 max	-	≤0.040	≤0.040	0.010 max
B		-	-	0.001-0.006	≤0.005	-
Sn		-	-	-	-	0.010 max
As		-	-	-	-	0.010 max
Sb		-	-	-	-	0.005 max
Mez pevnosti v tečení pro 10 <sup>5</sup> hod.	600°	94	(115)	(115)	(115)	(150*)

46

## Složení materiálů na bázi Ni

Element	Ni	Cr	Co	Mo	Other
Material					
625	63,5	21,5	0	9	6
617	52	22	12	9,5	4,5
C263	51	20	20	6	3
740	50	24	20	0	6

47

## Oceli T23 a T24

- vyvinuty pro konstrukci membránových stěn výparníku superkritických kotlů
- představují nástupce parametricky již nevyhovující oceli T22 (10CrMo9-10), ze které vycházejí, a byly dolegovány
  - japonská T23 wolframem,
  - německá T24 titanem
- obsahují jako legující prvek vanad, který tvoří stabilní karbidy či karbonitridy o velice jemné disperzi
- do hry vstupují intersticiální prvky bor a dusík, které mají rovněž prokázaný příznivý vliv na zvýšení žáropevnosti oceli

Material	C	Cr	Mo	W	Ti	Co	Others
<b>2 – 2.5 % Cr-steels:</b>							
T23	0.04 - 0.10	1.9 - 2.6	0.05 - 0.30	1.45 - 1.75	-	-	V, Nb, N, B
T24	0.05 - 0.10	2.2 - 2.6	0.9 - 1.1	-	0.05 - 0.10	-	V, N, B

- hlavní očekávaná přednost – lepší svařitelnost bez předehřevu, svary není třeba po provedení popouštět
- **očekávání se nepotvrdila** – svary po určité době při dosažení pracovní teploty vykazovaly nárůst tvrdosti a ztrátu pevnosti - **praskají**

48



## E On's 50% efficient plant

- účinnost +50% s užitím niklových slitin na trubky přehříváku pro teplotu 700 °C
- místo: Wilhelmshaven
- výkon: 500MWe

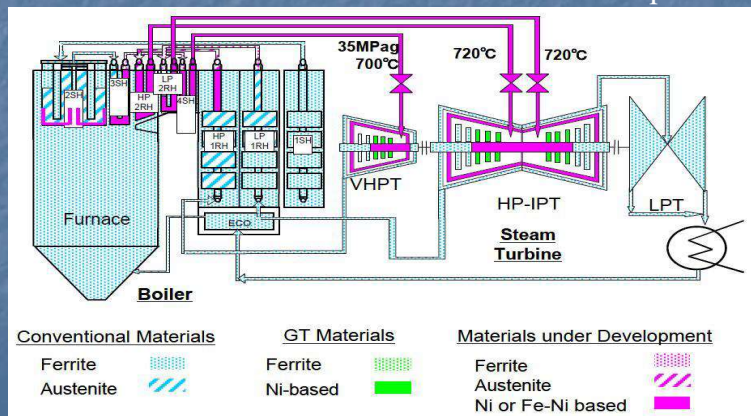
v r. 2010 projekt ukončen kvůli vysoké ceně a problémům se svařováním a tepelné úpravě po svařování



49

## USC technologie v Japonsku

- METI Cool Earth zahájila USC program v roce 2008 vývojem a vyhodnocením materiálů pro komponenty kotle a turbíny
- komerční stav s účinností 48% se očekává kolem po r. 2020



50

# USC technologie v Číně

## ■ parametry Pingshan II a budoucí technologie

Fuel Specifications	Design Condition		Annual Average Load Rate at 80%	
	Elevated T-G unit with 600 °C (1112 °F) Main Steam Temp.	Future Elevated T-G unit with 700 °C (1292 °F) Main Steam Temp.	Elevated T-G unit with 600 °C (1112 °F) Main Steam Temp.	Future Elevated T-G unit with 700 °C (1292 °F) Main Steam Temp.
<b>Annual Average Coal Consumption Rate</b>	246.7 g/kWh (0.54 lb/kWh)	231.8 g/kWh (0.51 lb/kWh)	251.7 g/kWh (0.55 lb/kWh)	236.2 g/kWh (0.52 lb/kWh)
<b>Annual Average Net Efficiency, LHV</b>	49.8%	53.0%	48.8%	52.0%
<b>Heat Rate</b>	6,897 kJ/kWh (6,537 Btu/kWh)	6,621 kJ/kWh (6,275 Btu/kWh)	7,377 kJ/kWh (6,992 Btu/kWh)	6,923 kJ/kWh (6,562 Btu/kWh)
<b>Annual Average CO<sub>2</sub> Emissions (Gross)</b>	622.7 g/kWh (1.37 lb/kWh)	588.2 g/kWh (1.30 lb/kWh)	635.4 g/kWh (1.40 lb/kWh)	599.5 g/kWh (1.32 lb/kWh)
<b>Annual Average CO<sub>2</sub> Emissions (Net)</b>	666.0 g/kWh (1.47 lb/kWh)	625.7 g/kWh (1.38 lb/kWh)	679.6 g/kWh (1.50 lb/kWh)	637.8 g/kWh (1.41 lb/kWh)

51