

Pokročilé technologie spalování tuhých paliv

Možnosti zvyšování účinnosti parních kotlů

1

Může zvyšování obsahu CO₂ v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

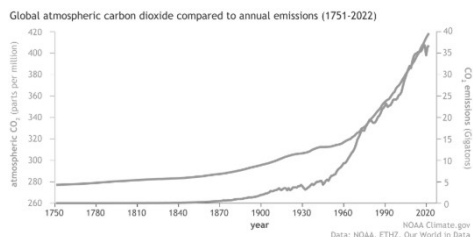
- otázka je komplexní a velmi složitá, nicméně pravděpodobně správná odpověď zní ANO

Lépe by bylo se ptát

- jak lidská činnost přispívá k produkci CO₂ resp. GHE
- jak se projeví dekarbonizační opatření plánovaná EU na celkovém snížení GHE

Může zvyšování obsahu CO₂ v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

- je jisté, že množství CO₂ vypouštěného ze spalovacích procesů do atmosféry roste



- jednoznačné spojení s rostoucí koncentrací CO₂ v atmosféře a oteplováním klimatu je však zjednodušené

Může zvyšování obsahu CO₂ v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

Celková bilance produkce CO₂

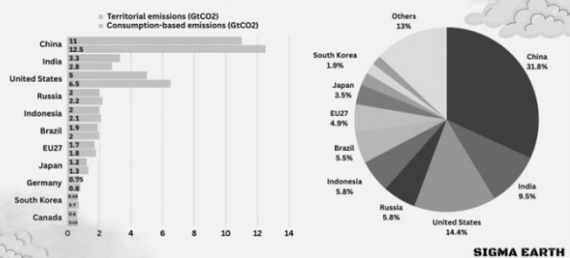
- oceány 54,9 %
- lesy 41,5 %
- lidská činnost 3,6 %

Podíl na GHE

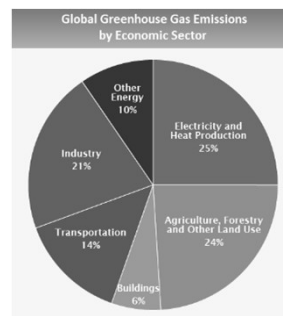
- vodní pára 60 %
- CO₂ 20 %
- metan 7,2 %
- další plyny (freony,...) 5,6 %

Může zvyšování obsahu CO₂ v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

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



Může zvyšování obsahu CO₂ v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?



Může zvyšování obsahu CO₂ v ovzduší změnit životní podmínky na Zemi?

Globální bilance

- celková emise GHC 100 %
- z toho CO₂ 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

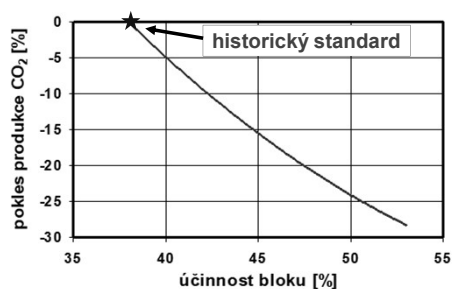
V celosvětovém měřítku uhlí v energetice nekončí

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 CO₂



10

Účinnost bloku uhelné parní elektrárny

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

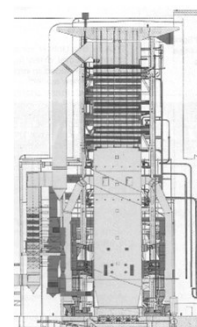
- kde je
- η_o účinnost reálného tepelného oběhu
 - η_k účinnost kotle
 - η_p účinnost parovodů
 - η_m mechanická účinnost turbíny
 - η_g účinnost generátoru
 - η_{tr} účinnost transformace
 - η_{vs} respektování vlastní spotřeby

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 :

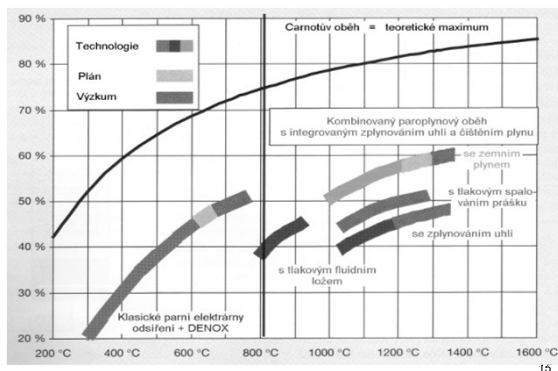
- na konstrukčním řešení spalovacího zařízení
- na konstrukčním řešení kotle
 - na velikosti koncových výhřevných ploch
 - ohříváku vody (EKO)
 - ohříváku vzduchu (OVZ)
 - na podmínkách přestupu tepla
- na vlastnostech uhlí – obsahu vody a popela

13

Vývojové trendy, nové systémy

14

Účinnost technologií na bázi využití uhlí



15

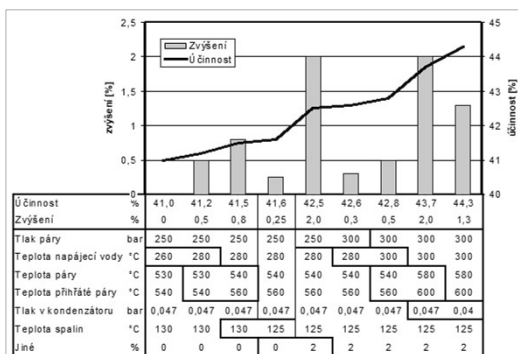
Klasické parní elektrárny

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

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

16

Způsoby zlepšení účinnosti elektráren



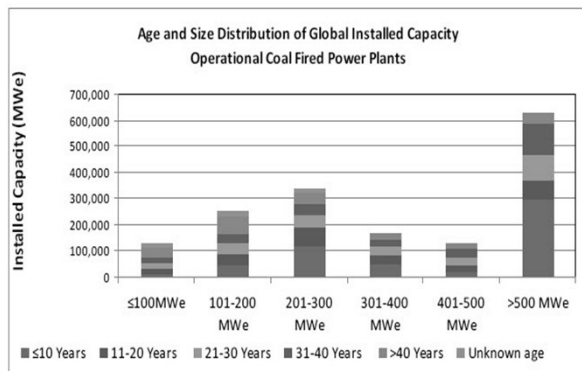
7

Parametry admissní 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

Práskové spalování uhlí



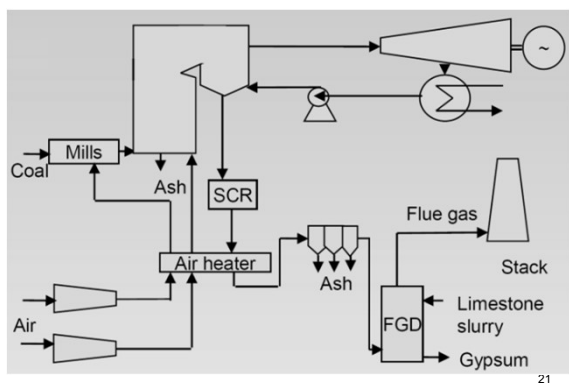
Práskové spalování uhlí

- 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 ($\eta > 50 \%$)

Práskové spalování uhlí

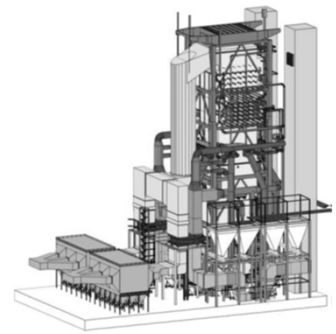


Nejnovější realizace na HU

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
přihřátá pára 55 bar/605°C
hmotnost 51500 t



Nejlepší světové realizace

Pingshan 2, Čína

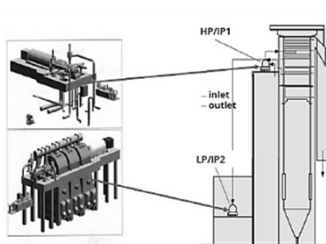
národní demonstrační projekt
do provozu 2022



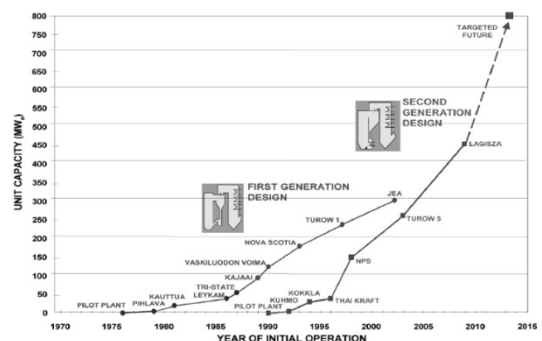
palivo ČU
čistý výkon 1350 MW
čistá účinnost 49,8 %

kotel

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



Nejlepší světové reference fluidní kotle



Spalování uhlí v cirkulující fluidní vrstvě

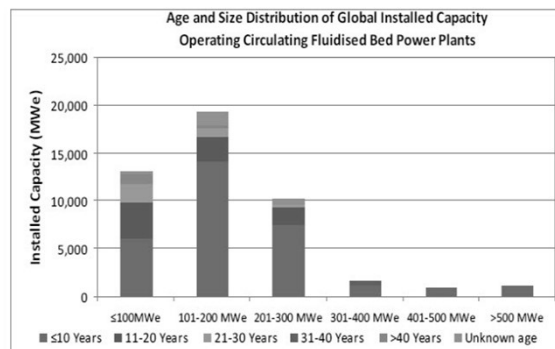
- instalovány stovky jednotek – výkony ve stovkách MWe
- vhodné pro uhlí nízké kvality a jiná paliva
- klasické metody pro snižování emisí dobře zvládnuty
- výhodou nízké emise NO_x a možnost aditivního odsiřování

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

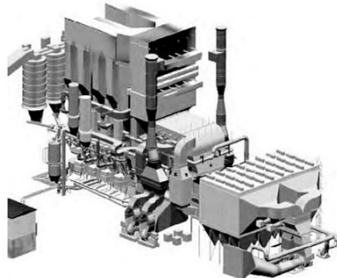
Spalování uhlí v cirkulující fluidní vrstvě



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

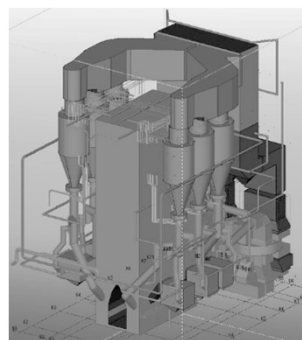


TABLE 1. Design parameters of the 600-MW, SC CFB boiler

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_2 emission	mg/Nm ³	<380
NO_x emission	mg/Nm ³	<200

28

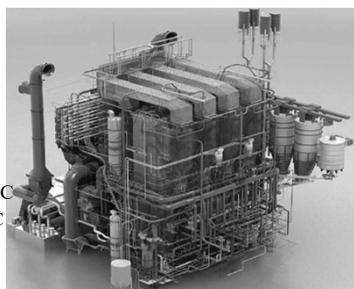
Nejlepší světové reference

Samcheok, Jižní Korea 1000 MWe

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

kotel

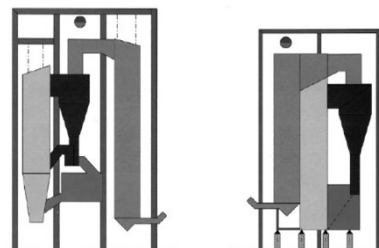
FW koncept, průtočný
 parní výkon 436 kg/s
 ostrá pára 257 bar/603°C
 přehřátá pára 54 bar/603°C
 nap. voda 297 °C



29

Vývojové trendy fluidních kotlů

vývoj kompaktního fluidního kotle (Lurgi)



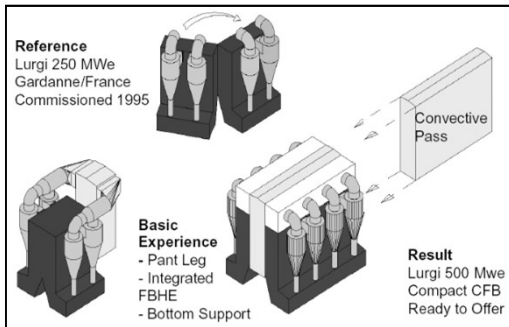
Original CFB Design

Bottom Supported Compact Design

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

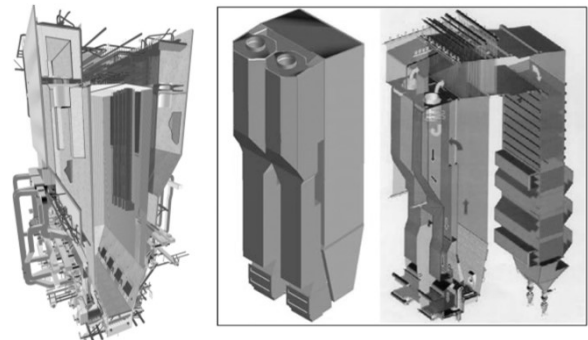
30

Vývojové trendy fluidních kotlů vývoj kompaktního fluidního kotle (Lurgi)



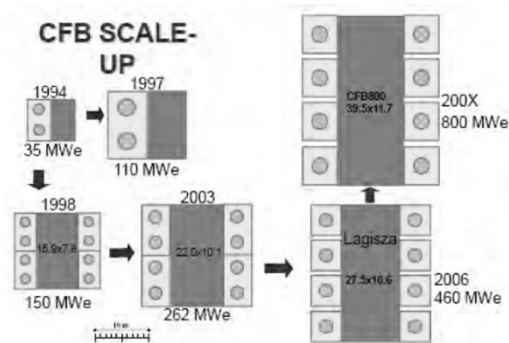
31

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



32

Vývojové trendy fluidních kotlů zvysování kapacity kompaktních ohnišť



33

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



34

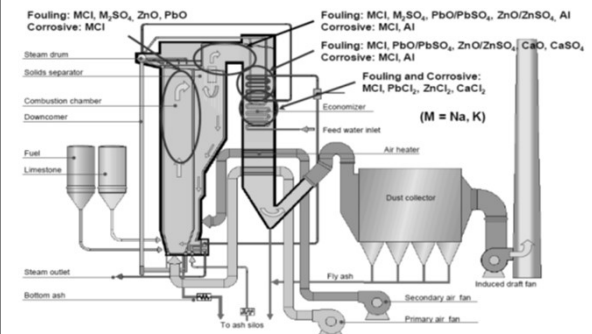
Vývojové trendy fluidních kotlů modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

- problémy související s přítomností chloru a alkalických příměsí v palivu
- chlor je vázán
 - v TAP v plastech (PVC) a anorganických alkalických chloridech (NaCl, KCl, CaCl₂)
 - v agrární biomase (sláma) zejména ve formě 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 násoy
- chlor v kotli způsobuje vysokoteplotní chlorovou korozi
 - v oblasti spalovací komory – do procesu se zapojují roztažené soli alkalických chloridů a síranů - vznikají reakce mezi plynnými produkty spalování SO₂ a SO₃, s oxidy Na₂O a K₂O
 - v oblasti přehříváků – pod povrchem alkalických násoy vzniká cyklický korozní mechanismus s 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

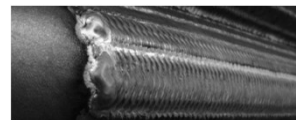
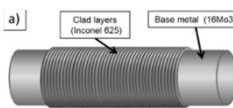
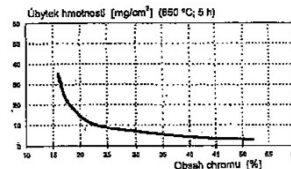
37

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 MWeI
- tepelný výkon 240 MW

Aby nedošlo k zanášení a korozi, kotel má:

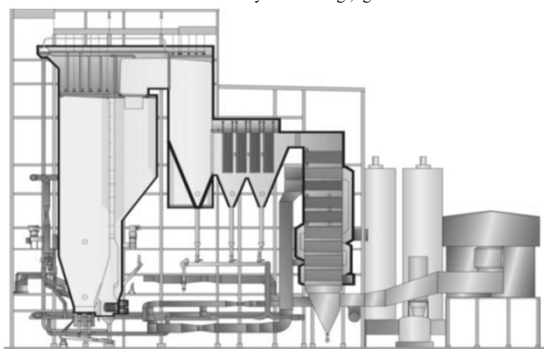
- koncový přehřívák umístěný v recirkulovaném fluidizačním materiálu
- prázdný tah pro prodloužení doby zdržení spalin, aby se ochladily a vyčistily před vstupem do konvektivních přehříváků
- vodní ostřikovače na bocích prázdného tahu pro čištění jeho stěn a pružinová kladiva pro oklepávání usazenin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

39

Vývojové trendy fluidních kotlů

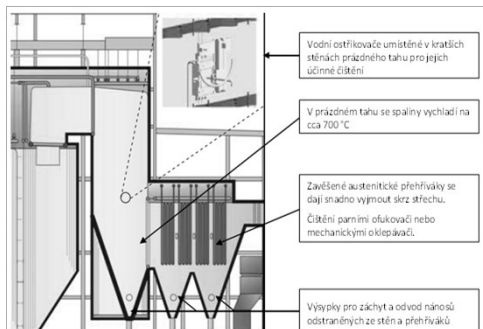
modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP

kotel elektrárny Soderenergi, Igelsta



Vývojové trendy fluidních kotlů

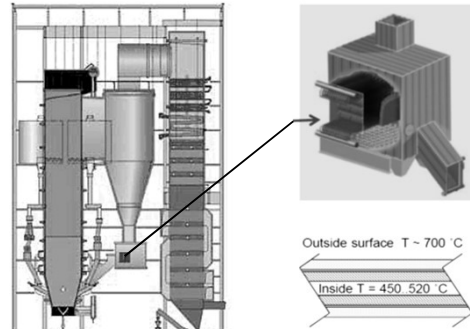
modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP
opatření aplikovaná pro omezení zanášení a koroze výhřevných ploch



41

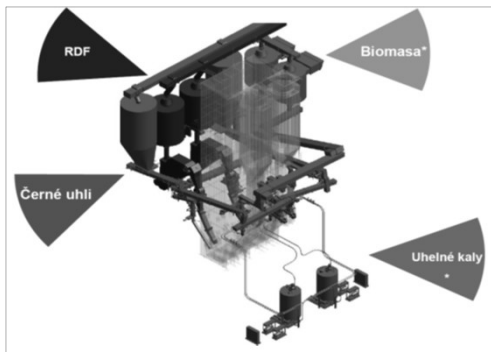
Vývojové trendy fluidních kotlů

modifikované koncepce pro spalování biomasy a TAP
výstupní přehřívák umístěný do recirkulovaného materiálu fluidního lože



42

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:

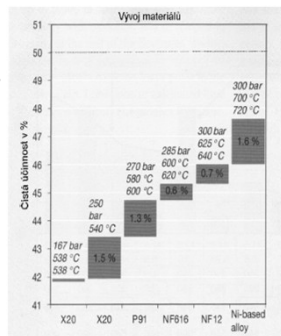
- vysoká žárupevnost a plasticita při creepu
- zvýšená korozní odolnost v prostředí vodíku, vodní páry a zplodin hoření
- vysoká tepelná vodivost
- nízká teplotní roztažnost
- dobré technologické vlastnosti vč. svařitelnosti
- nízká cena

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 ⁻³ hod.	600*	94	(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 výparníků superkritických kotlů
- představují nástupce parametricky již nevyhovující oceli T22 (10CrMo9-10), ze které vycházejí, a byly doloženy
 - japonská T23 wolframem,
 - německá T24 titámem
- 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 prokázány příznivý vliv na zvýšení žárupevnosti oceli

Material	C	Cr	Mo	W	Ti	Co	Others
2-2.5% Cr-steels							
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, svarů není třeba po provedení popouštění
- 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

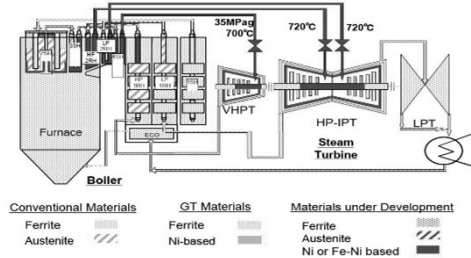
v r. 2010 projekt ukončen kvůli vysoké ceně a problémům se svařováním a tepelné úpravě po svařování



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.
Annual Average Coal Consumption Rate	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)
Annual Average Net Efficiency, LHV	49.8%	53.0%	48.8%	52.0%
Heat Rate	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)
Annual Average CO ₂ Emissions (Gross)	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)
Annual Average CO ₂ Emissions (Net)	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