

「高温材料入門」

火力発電の高効率化を目指して

知能デバイス材料学専攻

丸山 公一

話 の 内 容

- 火力発電の現状
 - なぜ高温材料？
- 発電効率向上における材料の課題
 - 蒸気タービン発電
 - ガスタービン発電

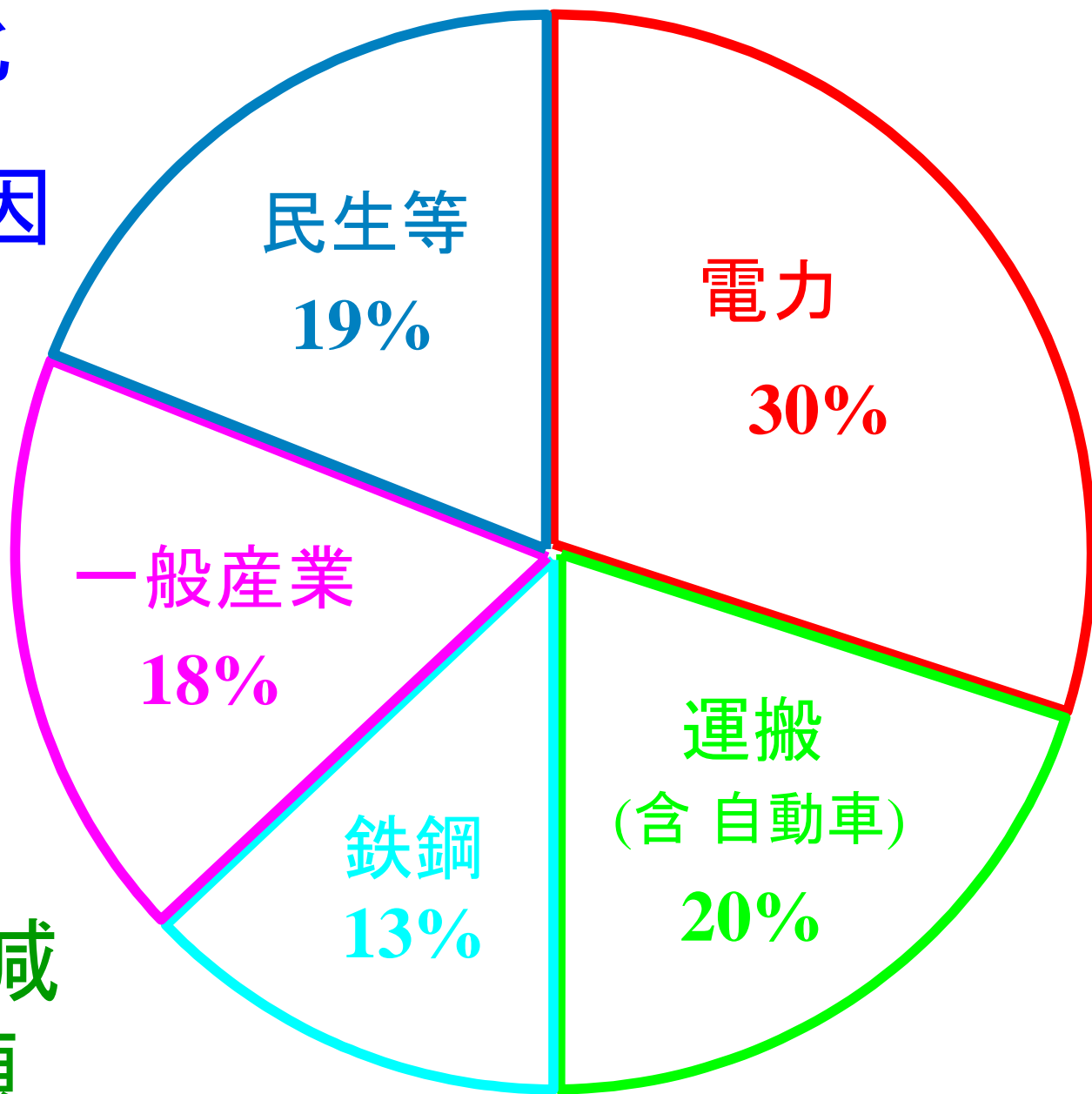
地球温暖化

CO₂が主原因

CO₂発生源

発電が最大

発電での
CO₂排出削減
は重要課題

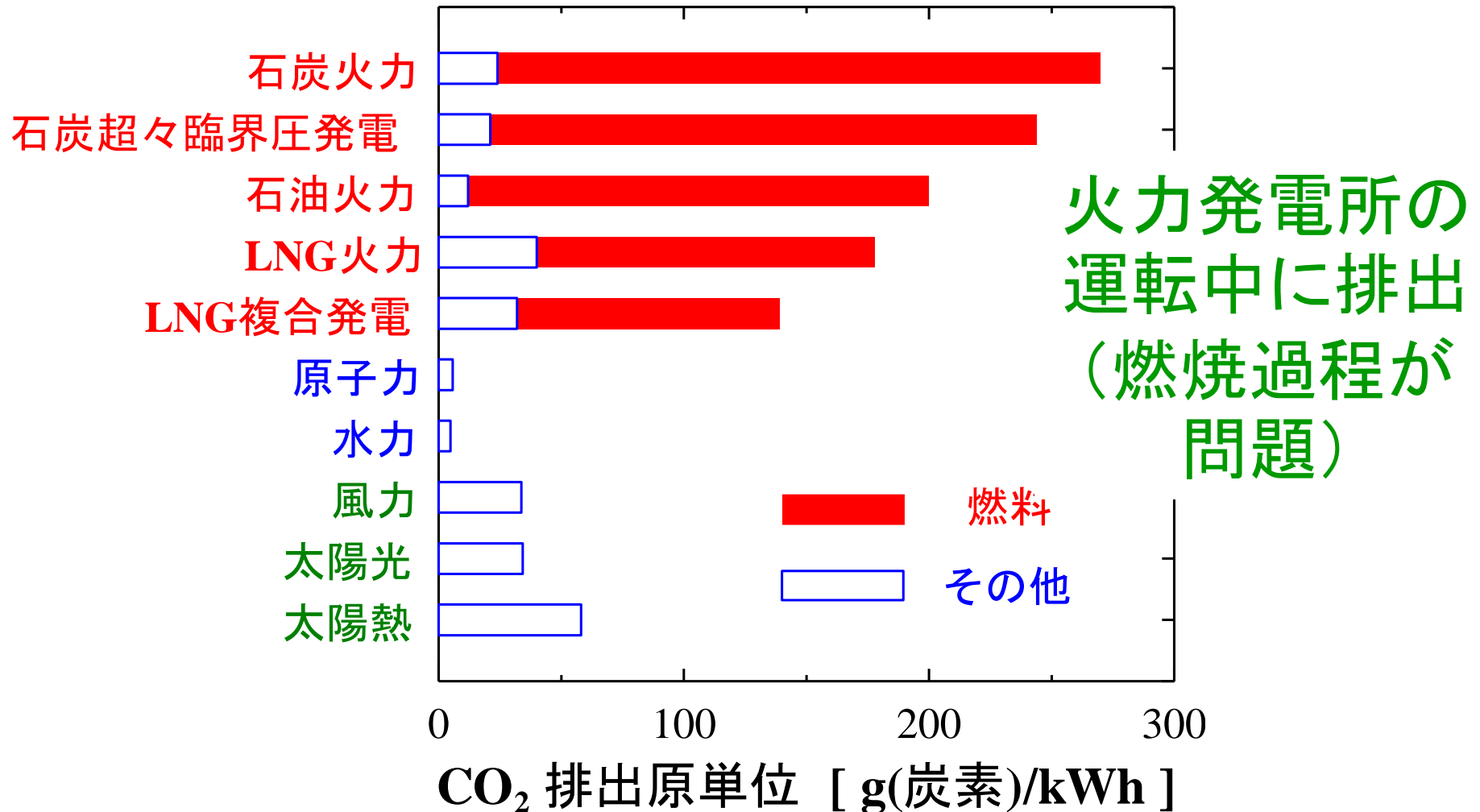


発電の様式

- 蒸気タービン
 - 原子力 (CO₂排出無し) 30%
 - 石炭, 石油 (CO₂排出) 35%
- ガスタービン (蒸気タービンと複合)
 - LNG (CO₂排出) 25%
- 水力 10%
- 自然エネルギー (太陽光, 風力)

「CO₂の排出原因」

建設, 運転, 廃棄: 総CO₂排出量



原発廃止後の電力供給

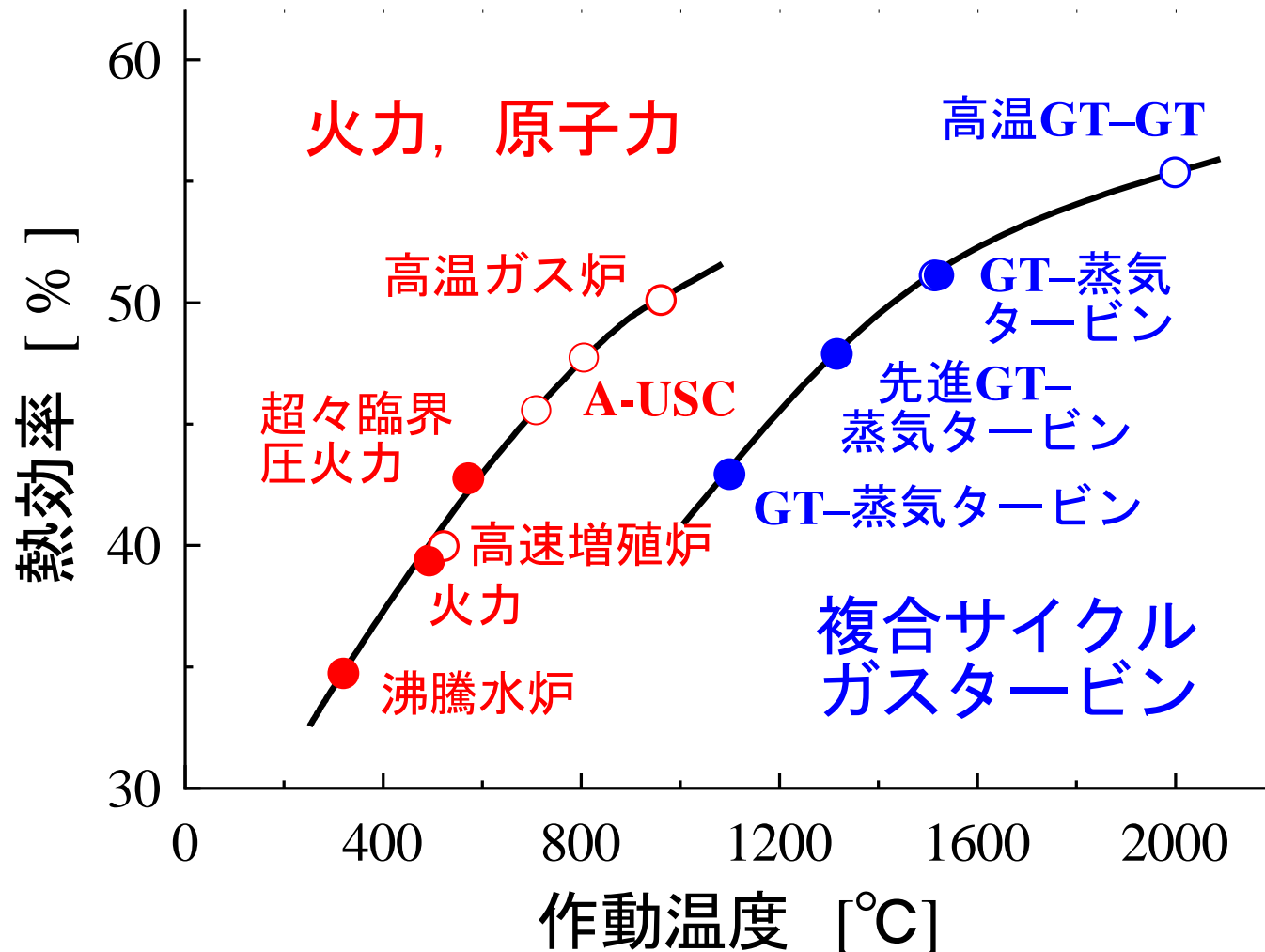
	火力	原子力	水力	自然エネルギー
フランス	10%	77%	11%	2%
ドイツ	61%	24%	3%	12%
イタリア	81%	0%	13%	6%

原子力の減少を火力で代替。

ドイツでも再生可能エネルギー利用は15%

火力発電は、今後も最も重要
世界全体を見れば、46%が蒸気タービン火力

火力発電プラントの熱効率



Carnot Cycle と同様に

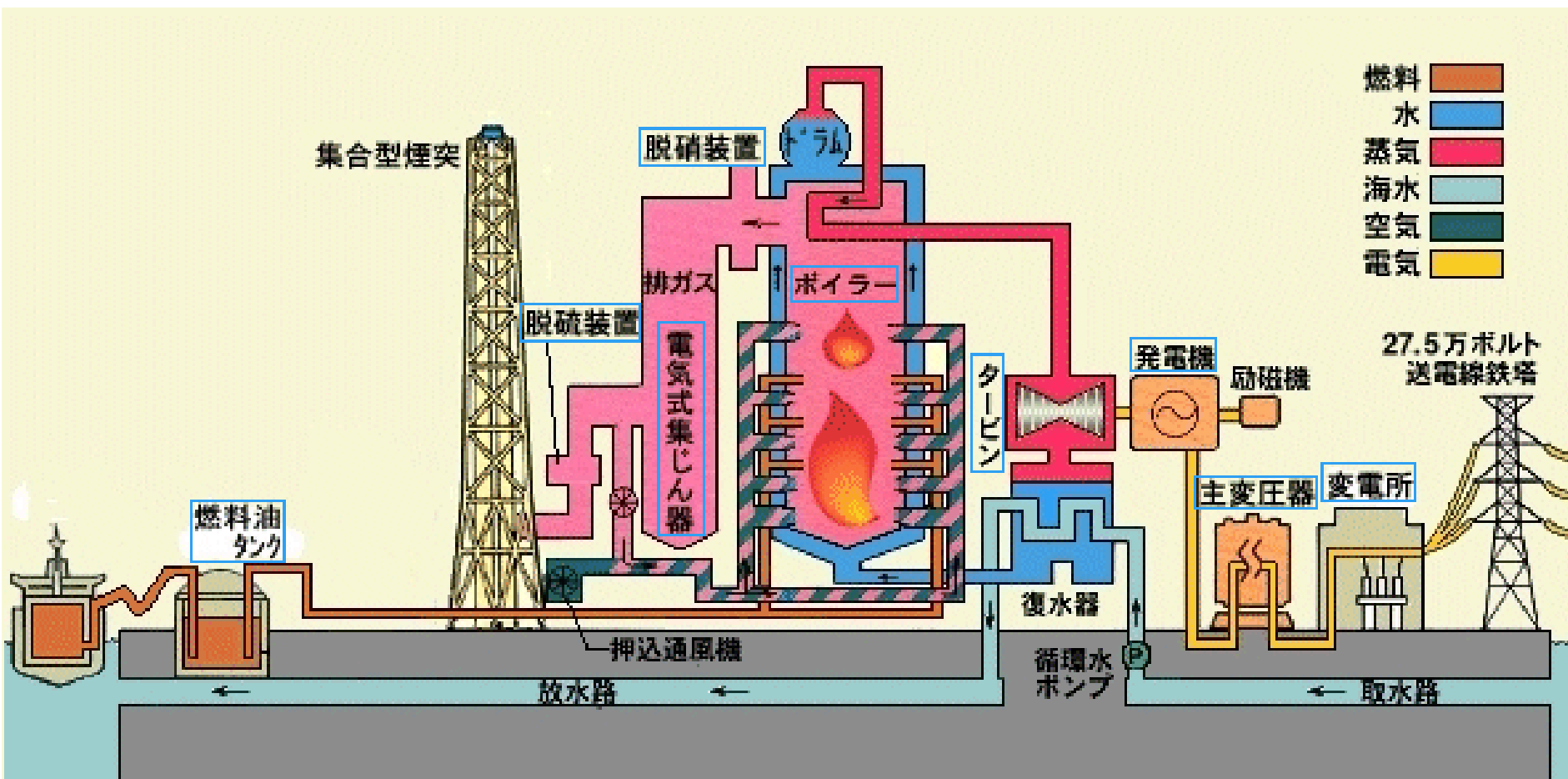
高温作動 → 高効率 → CO₂削減

発電効率向上における 材料の課題

- 蒸気タービン -

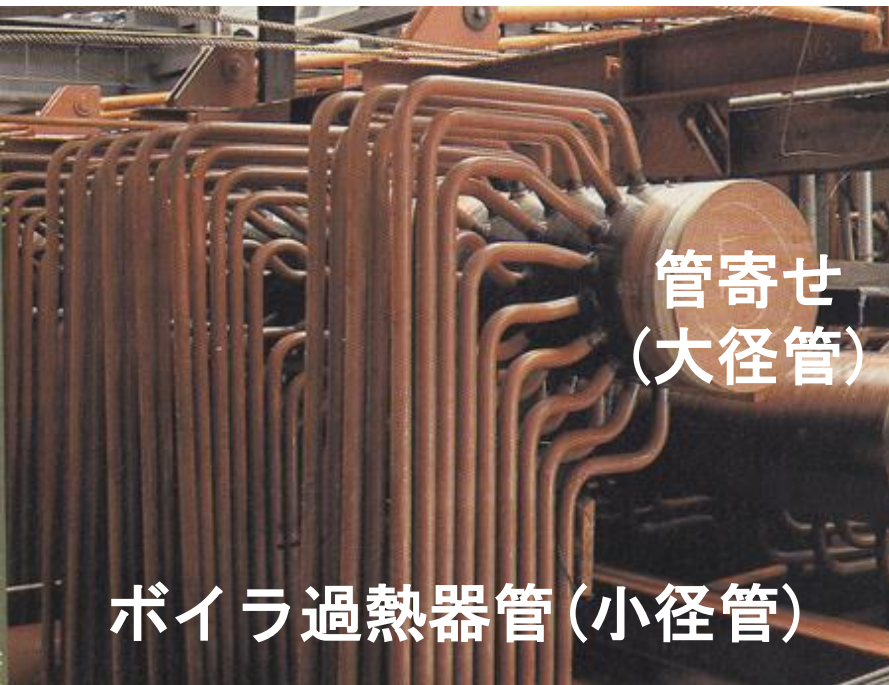
火力発電プラントの原理

やかんから出る蒸気で風車を回す熱機関



蒸気発電プラント配管

先進超々臨界圧蒸気： 250～300気圧
(A-USC) 700～800℃
(USC) 600℃)

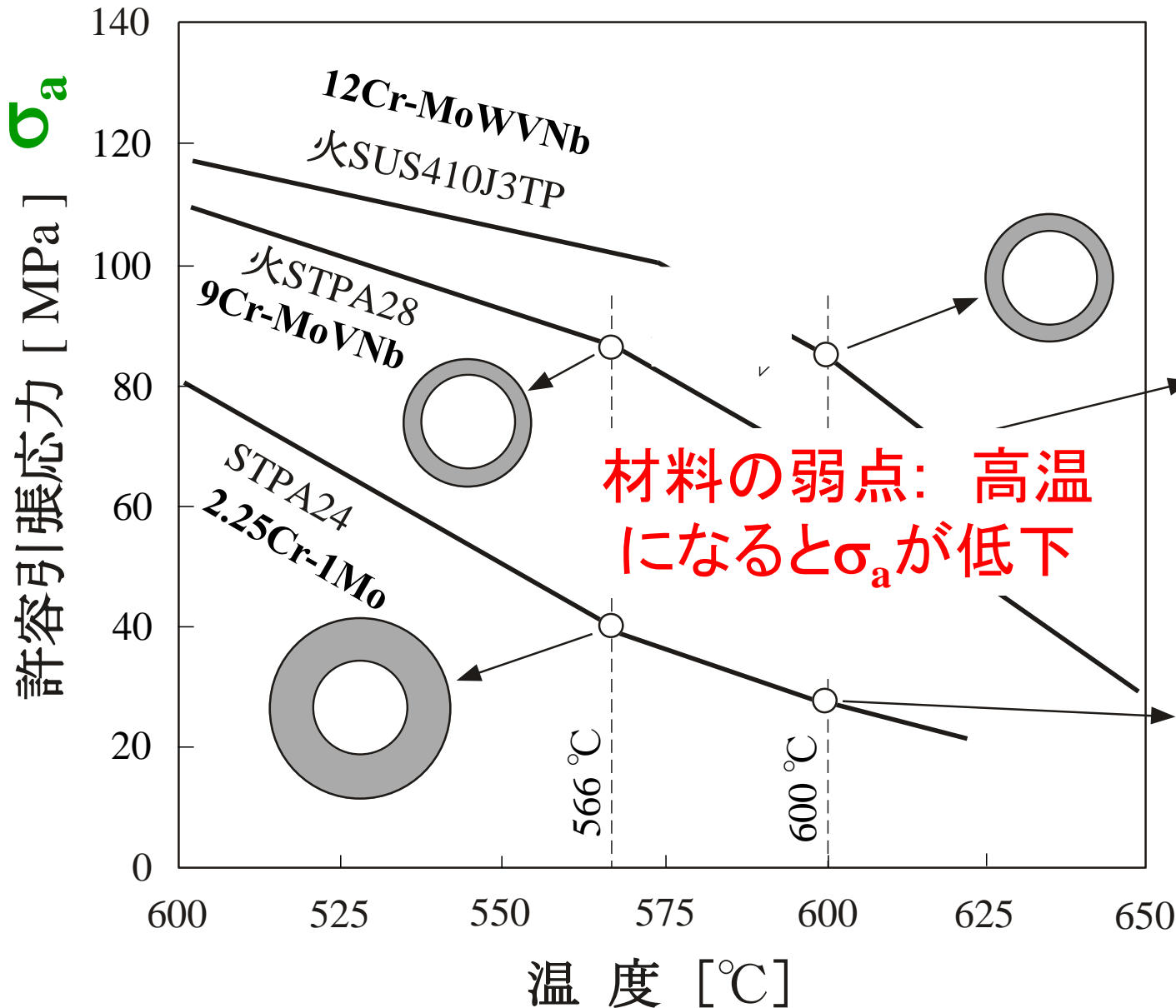


直径 10cm

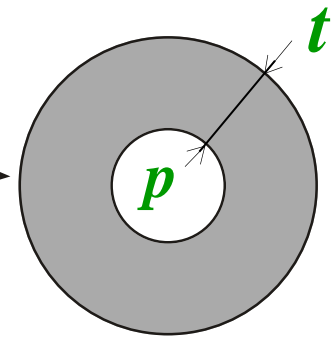


直径 60cm, 長さ 約200m

許容応力と配管サイズ

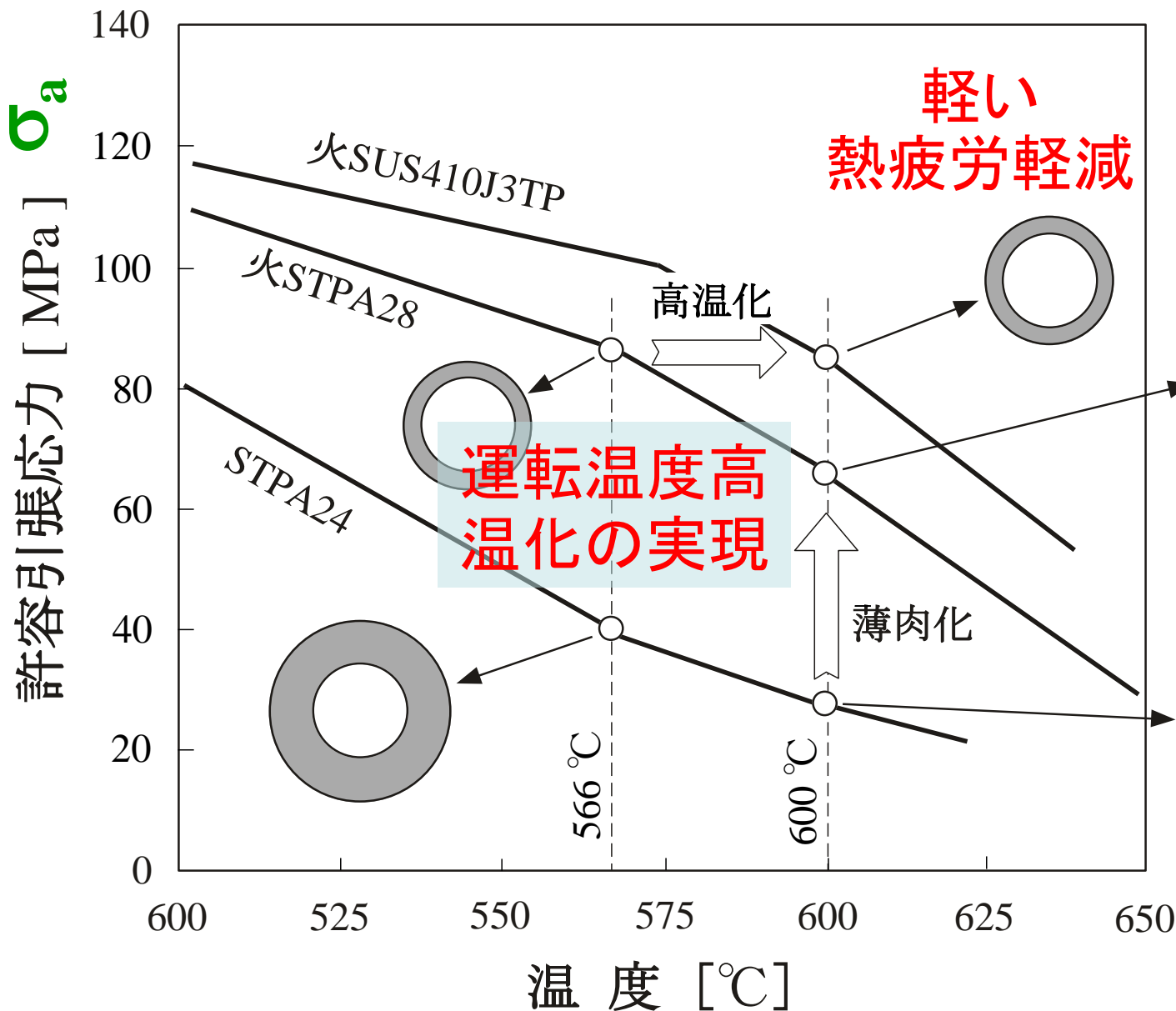


$$t > \frac{p r}{\sigma_a}$$

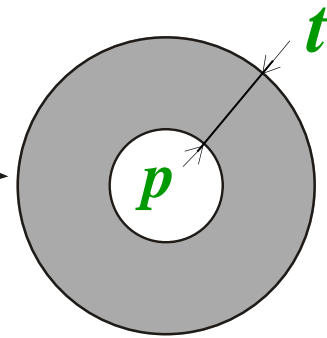


重い
熱疲労

許容応力と配管サイズ

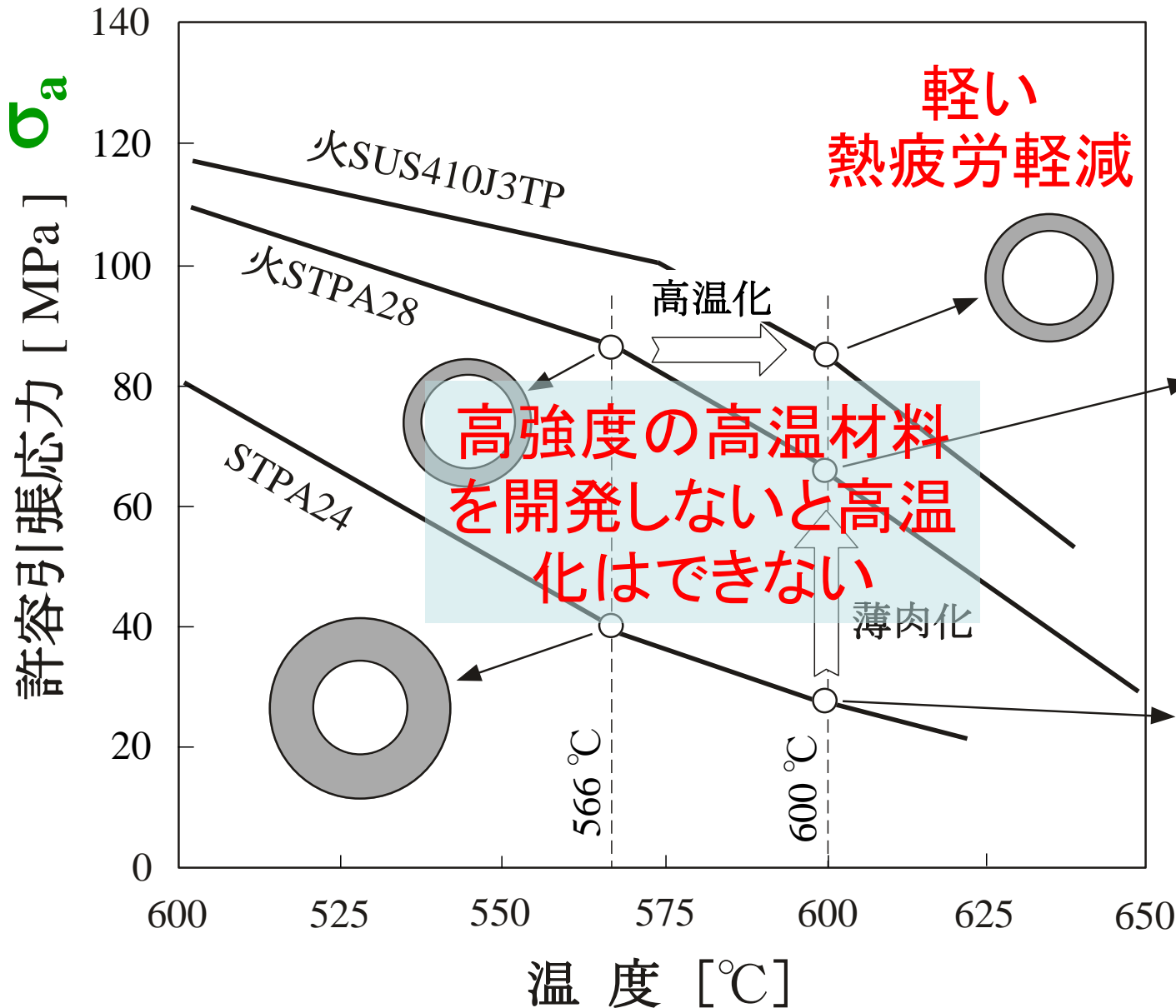


$$t > \frac{p r}{\sigma_a}$$

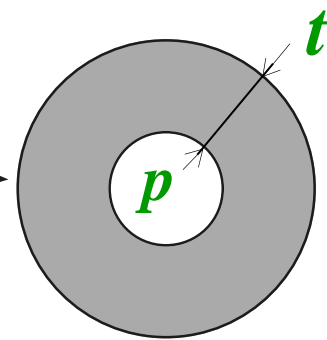


重い
熱疲労

許容応力と配管サイズ



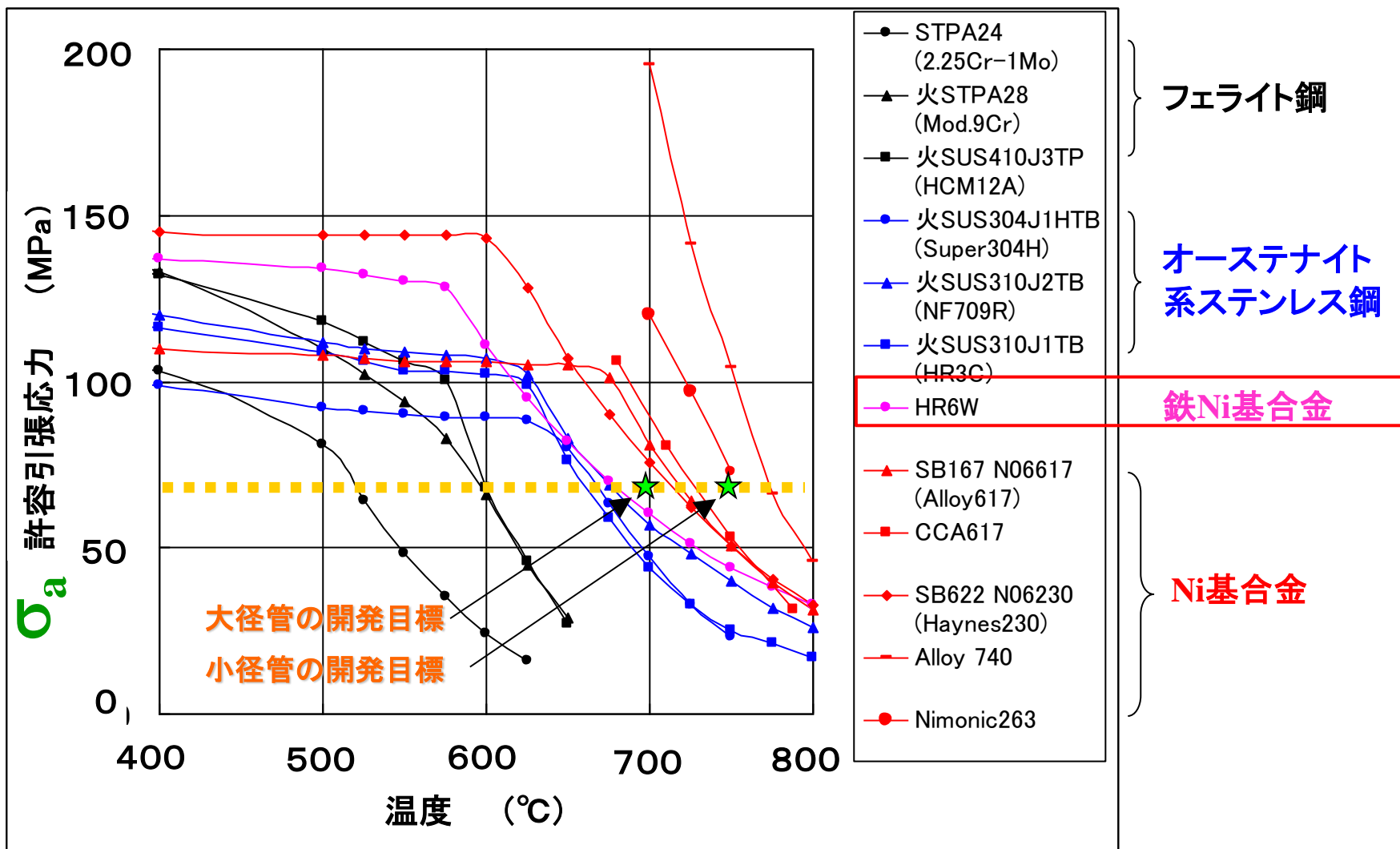
$$t > \frac{p r}{\sigma_a}$$



重い
熱疲労

A-USC候補材料の許容応力

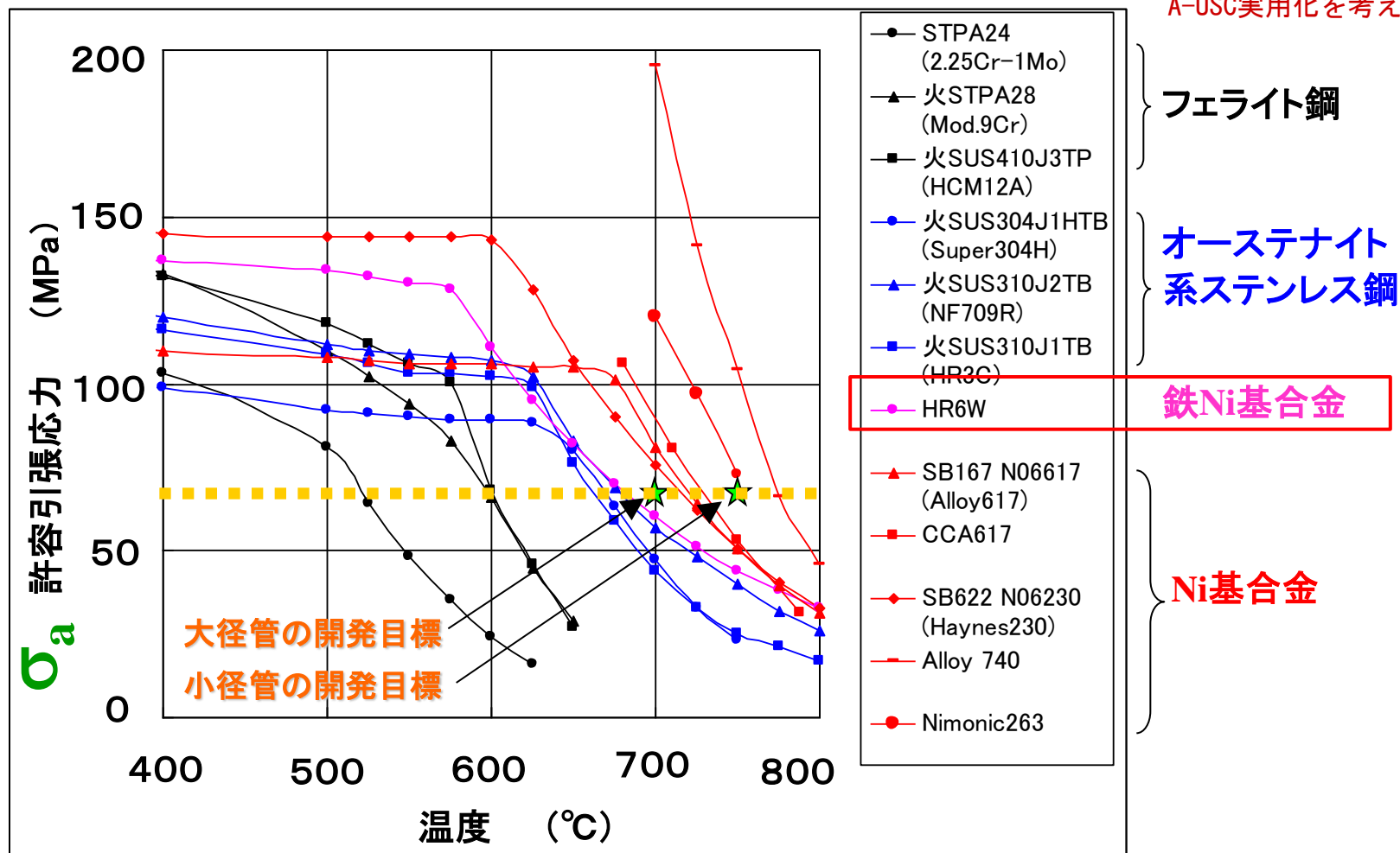
A-USC実用化を考える会



主蒸気管の要求値: 700°C, 67MPa

A-USC候補材料の許容応力

A-USC実用化を考える会



Ni基: 加工性向上と低コスト化が必要
鉄, 鉄Ni基: 薄肉化には高強度化が必要

高温材料の設計方針

変形速度が遅い

$$\dot{\varepsilon}_m = \dot{\varepsilon}_0 \sigma^n D$$

破断時間が長い

$$t_r = t_0 / (\sigma^n D)$$

$\dot{\varepsilon}_0$ が小さい (材料組織に依存)

t_0 が大きい (材料組織に依存)

D が小さい (母相となる物質に依存)

「 σ_a が高い高温材料の設計」

1. 母相の選択

$$\dot{\varepsilon}_m \propto D \quad t_r = 1 / D$$

拡散係数 D の小さい母相
(現在(600°C)はフェライト鋼)

拡散係数に対する結晶構造，磁気変態の影響

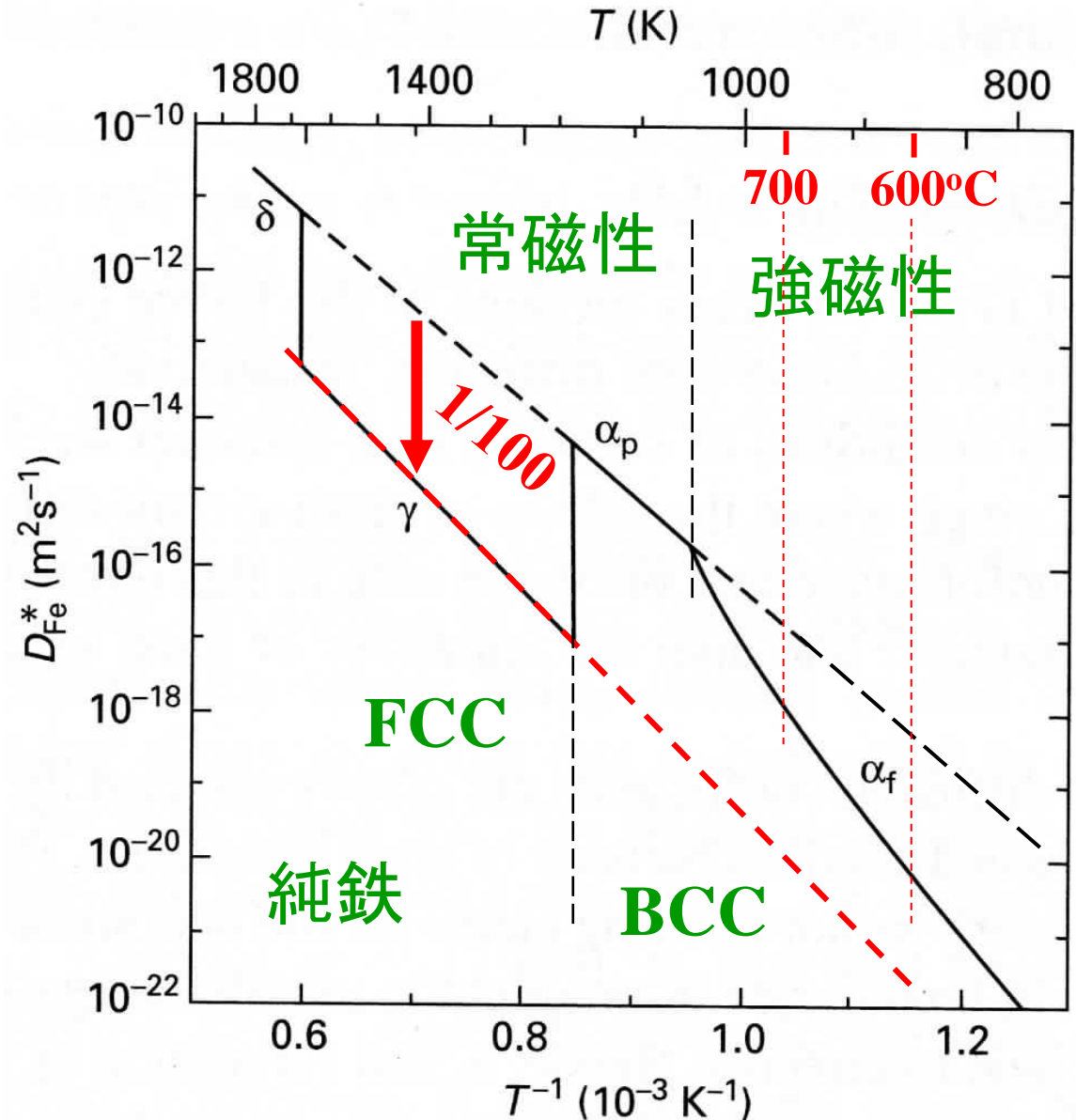
変形速度

$$= \dot{\varepsilon}_0 \sigma^n D$$

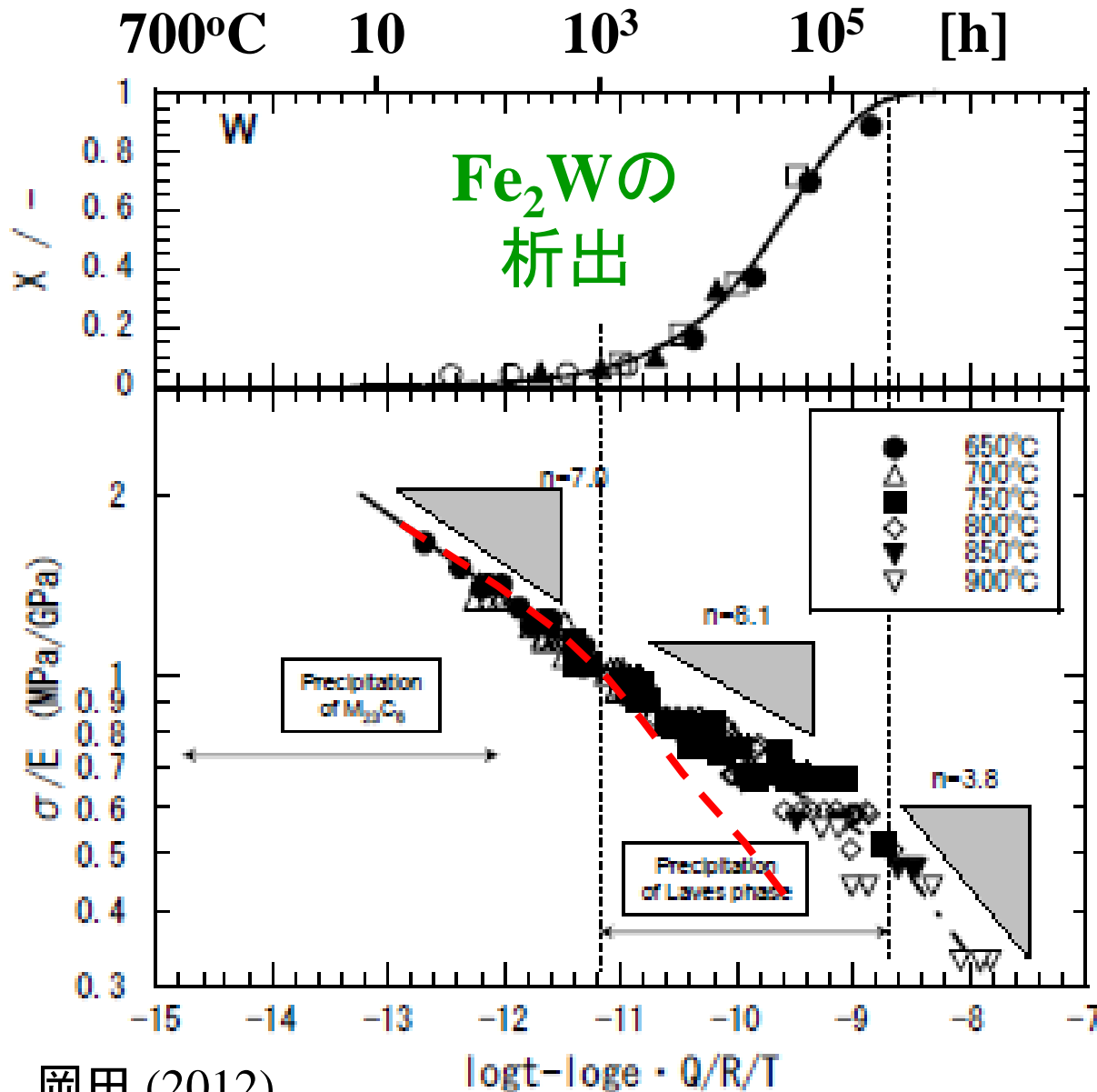
破断時間

$$= t_0 / (\sigma^n D)$$

FCC or 強磁性
体は D が小さい



HR6W の高温強度と Laves相析出

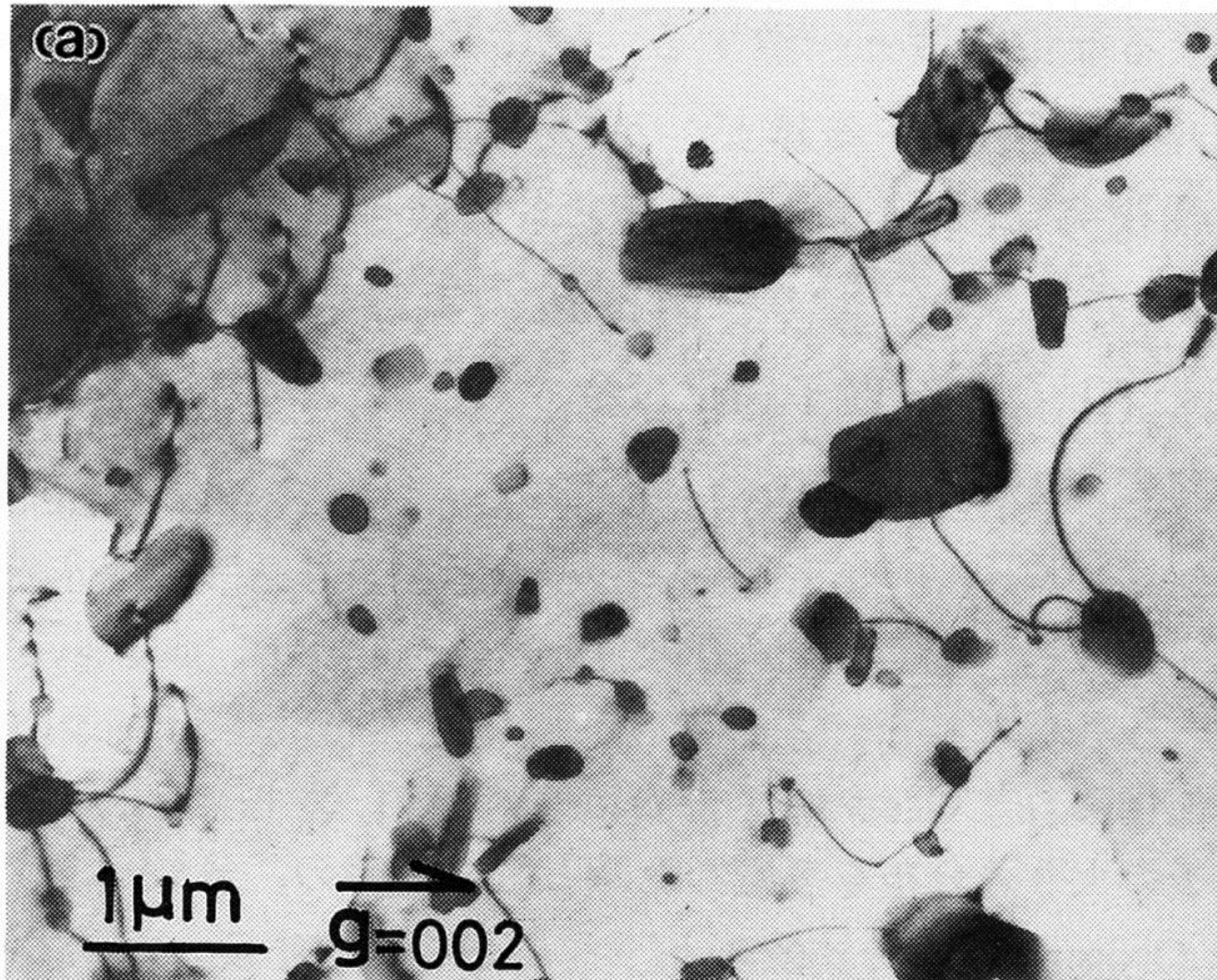


HR6W (Ni-23Fe-23Cr-7W-0.08C)

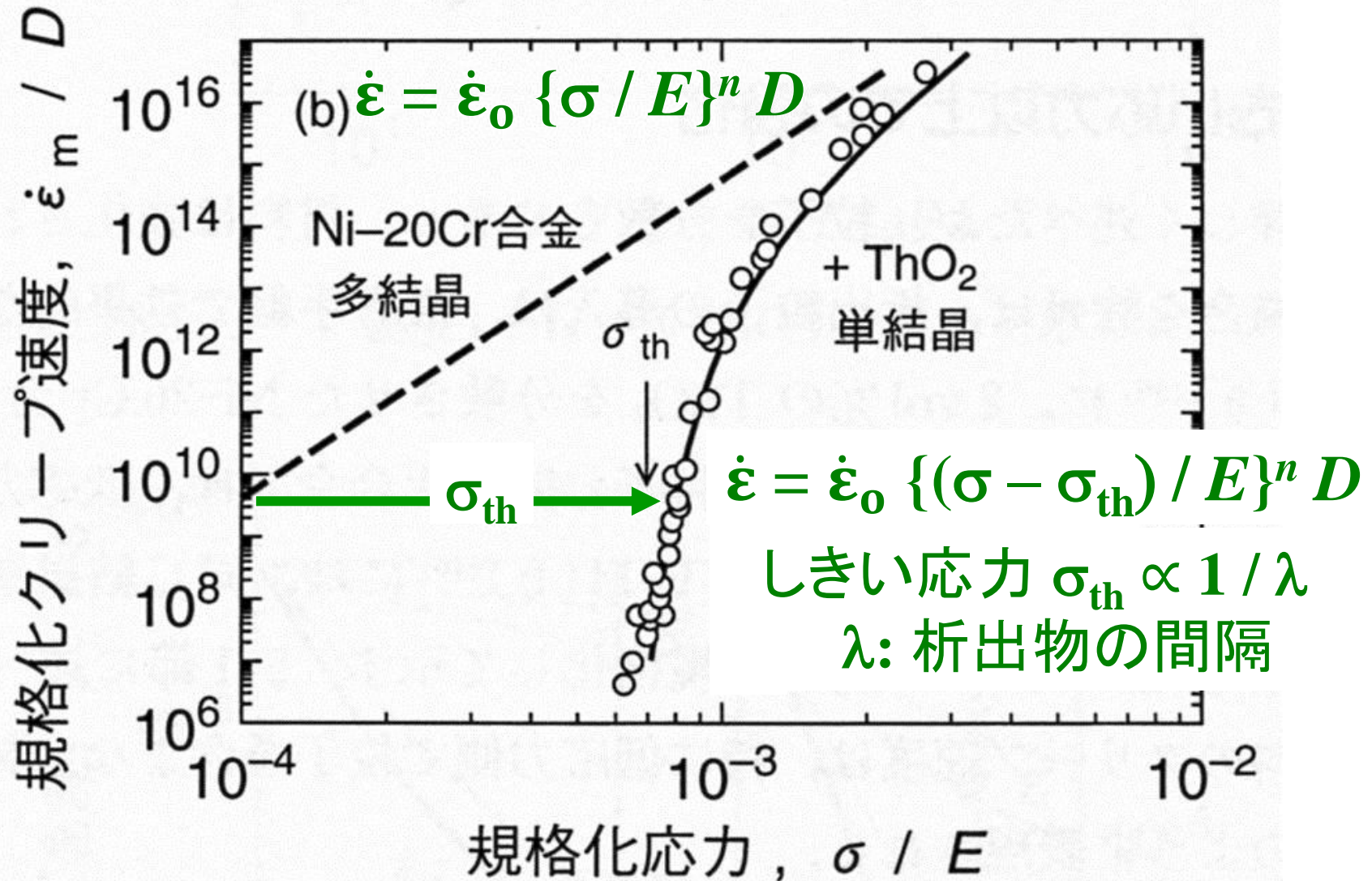
Laves相が析出を続けている間は、高強度を保つ。析出が終わると、析出物は凝集し、強度が低下。

析出物の成長抑制 → 高強度化

2. 粒子による材料の強化 (ϵ_0 の低下, t_0 の増加)



粒子強化材料の高温変形挙動



λ を小さく保てば, 高強度が維持可能

析出物凝集(Ostwald成長)の抑制

$$\dot{\varepsilon} \propto (\sigma - \sigma_{\text{th}})^n, \quad \sigma_{\text{th}} \propto 1 / \lambda$$

析出物間隔 λ を小さく保てば高強度を維持可能

析出物のOstwald成長（粒子体積比は一定）

$$\lambda^3 = \lambda_0^3 + \kappa t$$

$$\kappa \propto \gamma D C$$

γ : 析出物界面エネルギー

D : 元素Mの拡散係数

C : 元素Mの母相中濃度

低い界面エネルギー(整合析出物), 低い母相中濃度(酸化物)が凝集の抑制に効果的

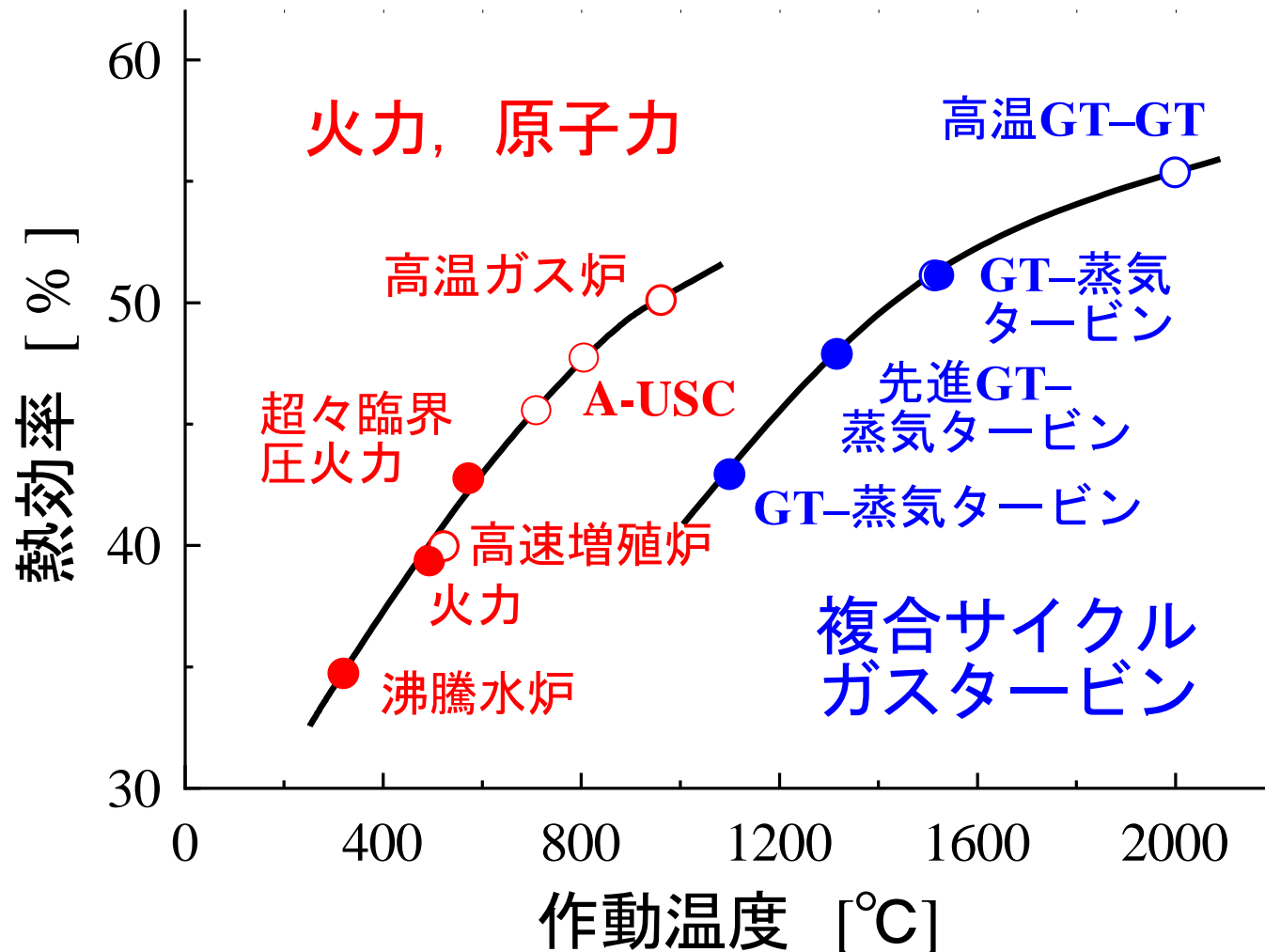
耐熱鋼の強化

組織安定性（特に変形中の析出物の成長挙動）に関する更なる研究を期待したい

発電効率向上における 材料の課題

- ガスタービン -

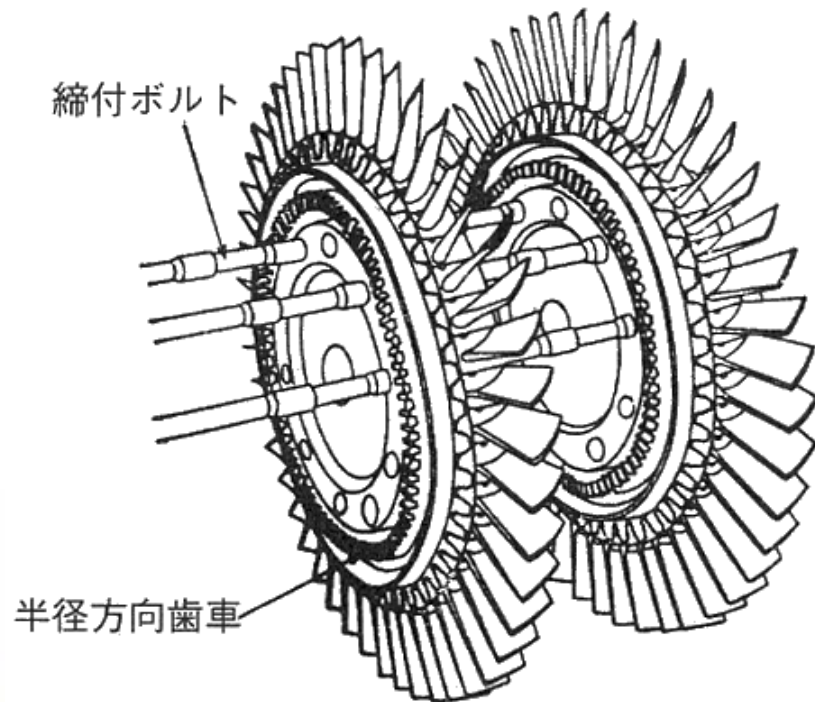
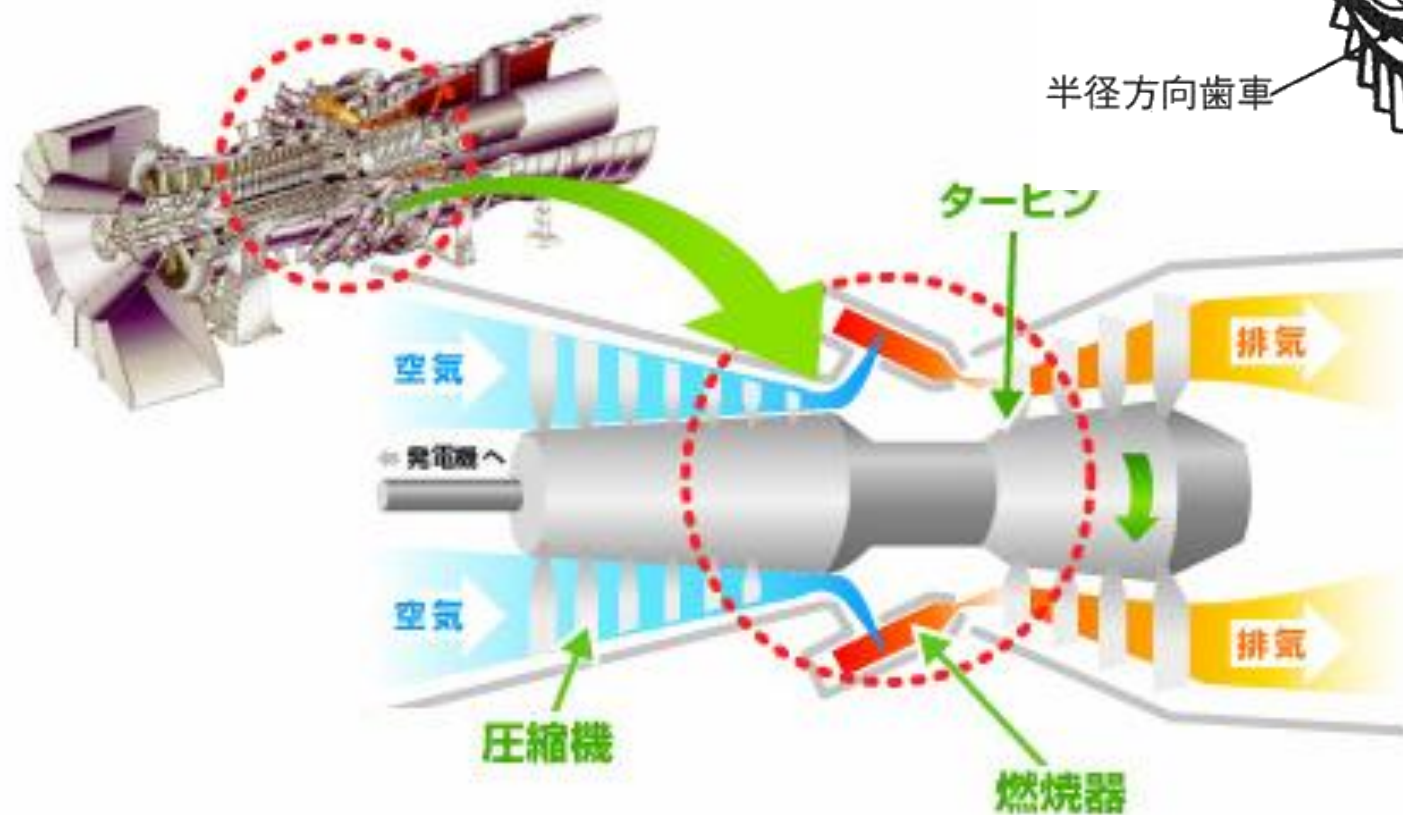
火力発電プラントの熱効率



Carnot Cycle と同様に

高温作動 → 高効率 → CO₂削減

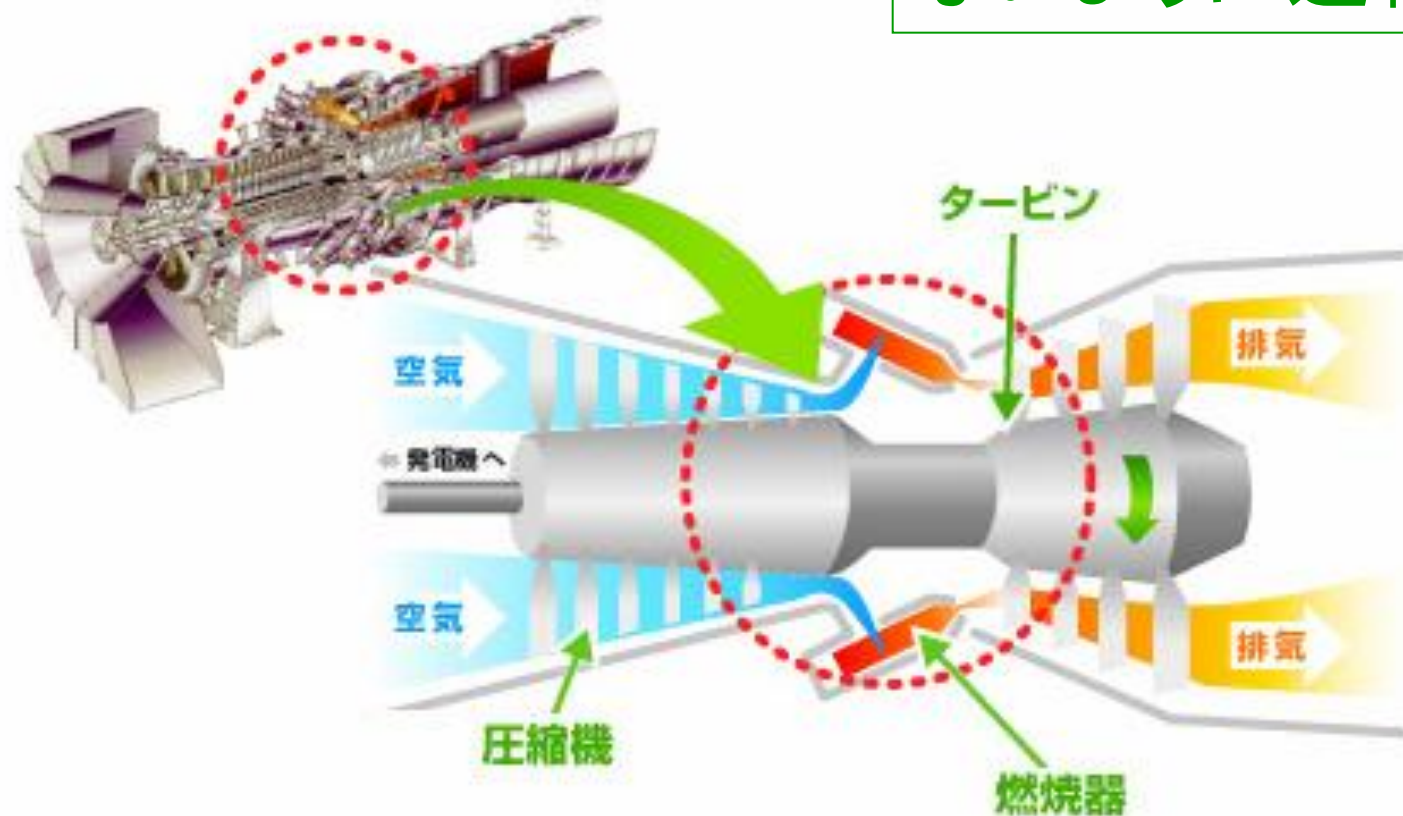
ガスタービン 発電機の構造



ガスタービン 発電機の構造

高温のガス中でタービン
動翼が高速回転

→ 動翼が伸びて破壊し
ないように運転する



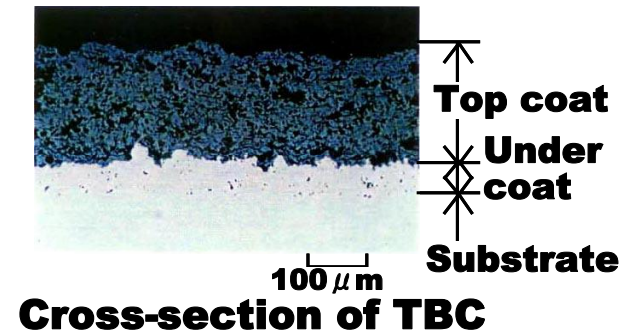
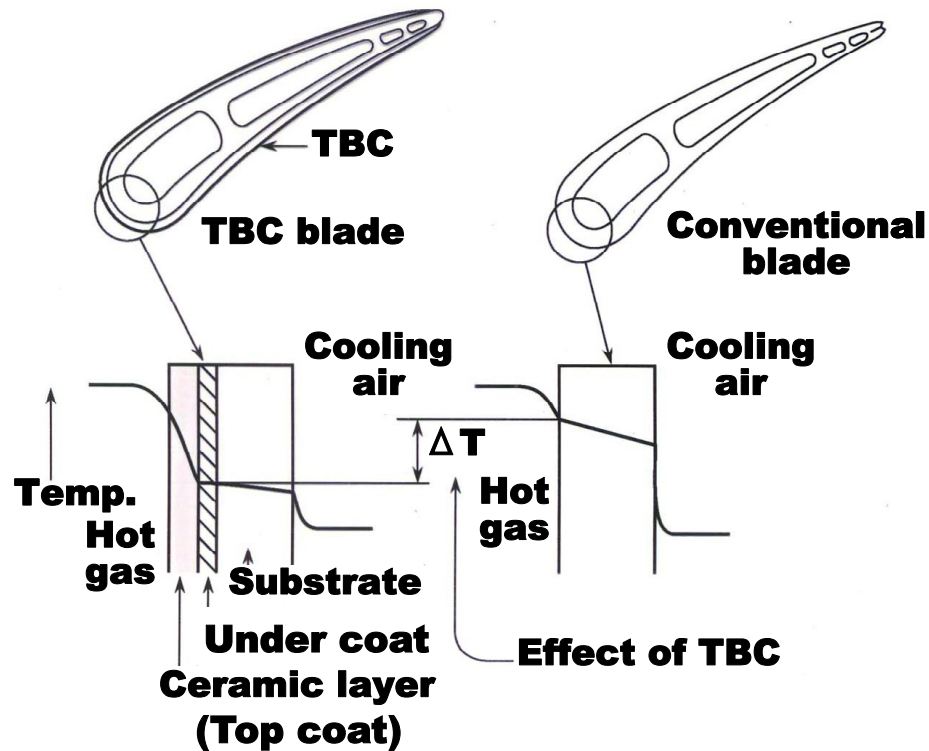
タービン
動翼が
**Key
Material**

ガスタービン動翼の材料

燃焼ガス温度 1500°C

- 動翼母材
 - Ni基超合金 $T_m = 1400^{\circ}\text{C}$
→ 母材の温度を下げる(900°C 付近)
- Thermal Barrier Coating (TBC)
 - 熱伝導率の小さい皮膜 (ZrO_2) を利用
- 冷却: 空気, 水蒸気

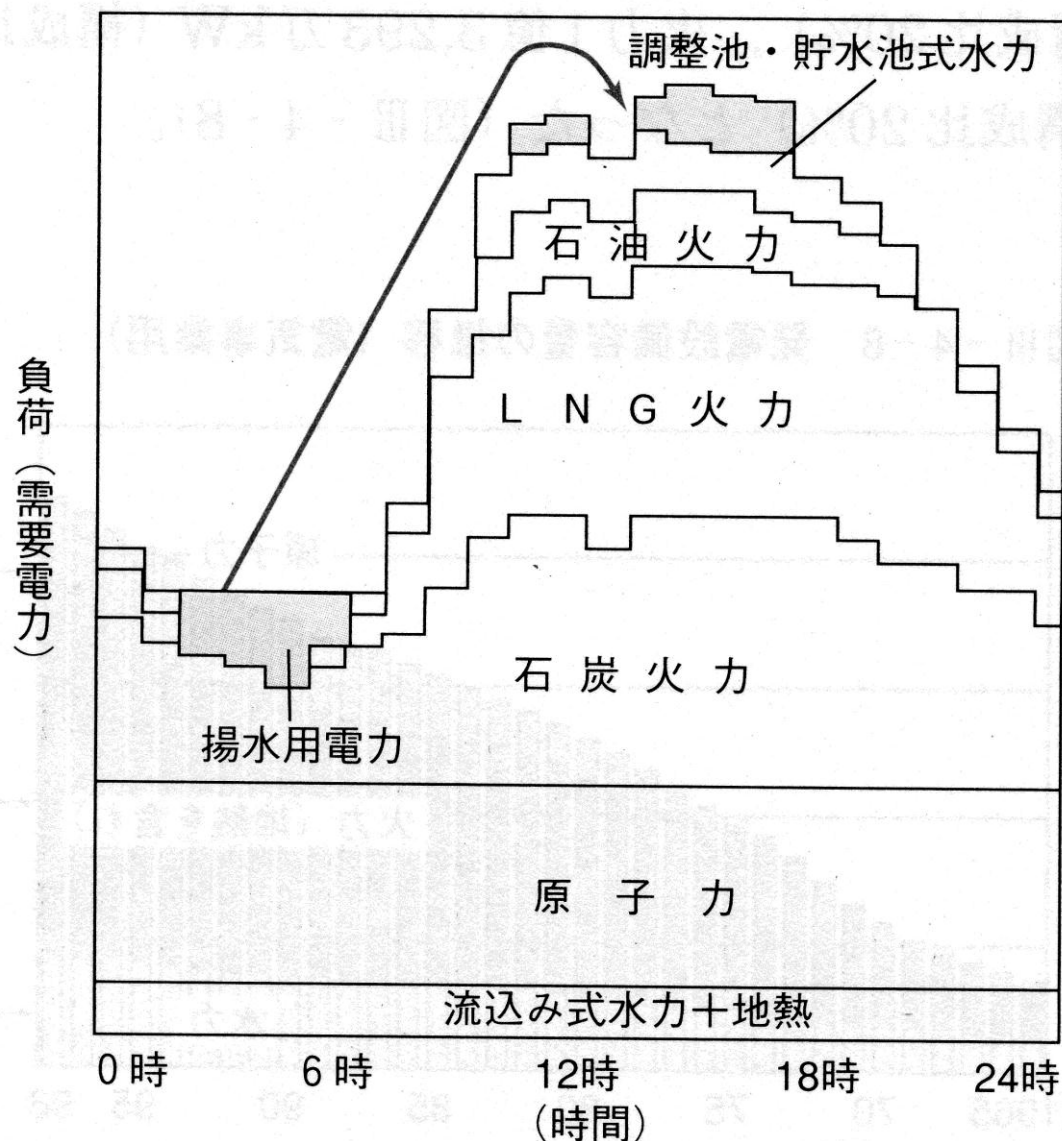
Thermal Barrier Coating (TBC)



動翼が高温で高速回転 → 伸びる

TBCと冷却で金属温度を下げ、伸びを防ぐ

電力の使い方 (日内変動)



火力発電
変動可能

石炭は安価

原子力発電
変動不可

ガスタービンの起動停止 温度変動 ($\Delta T = 1500 \text{ K}$) の影響

- 母材: Ni基超合金

$$\alpha = 16.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

- Under Coat: NiAl + Ni₃Al

$$\alpha = 15.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}, 17.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

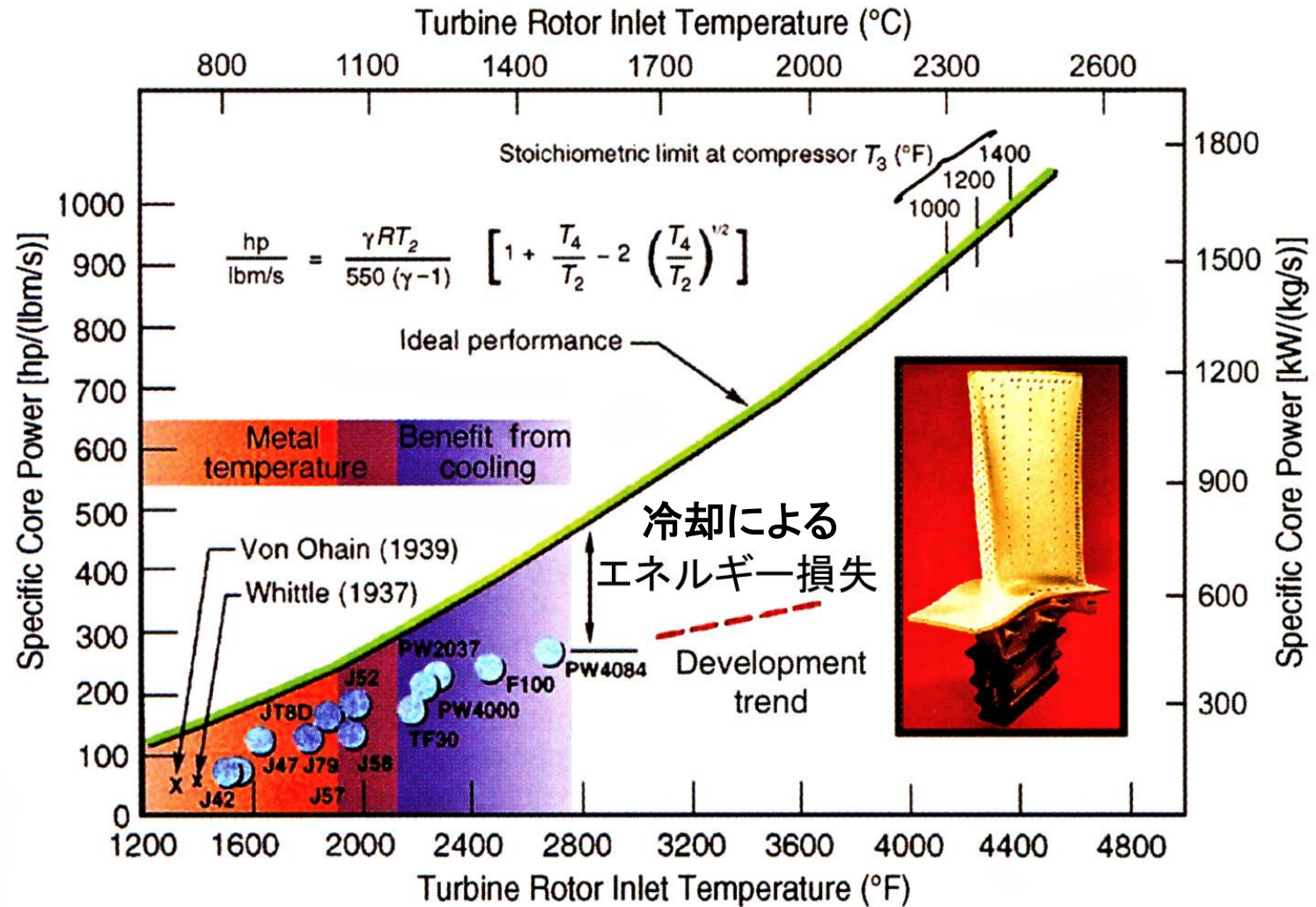
- Top Coat: ZrO₂-8%Y₂O₃

$$\alpha = 9.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

$$\Delta \varepsilon = 1\%$$

熱サイクル → 熱応力 → 皮膜剥離

ガスタービンの冷却とエネルギー損失

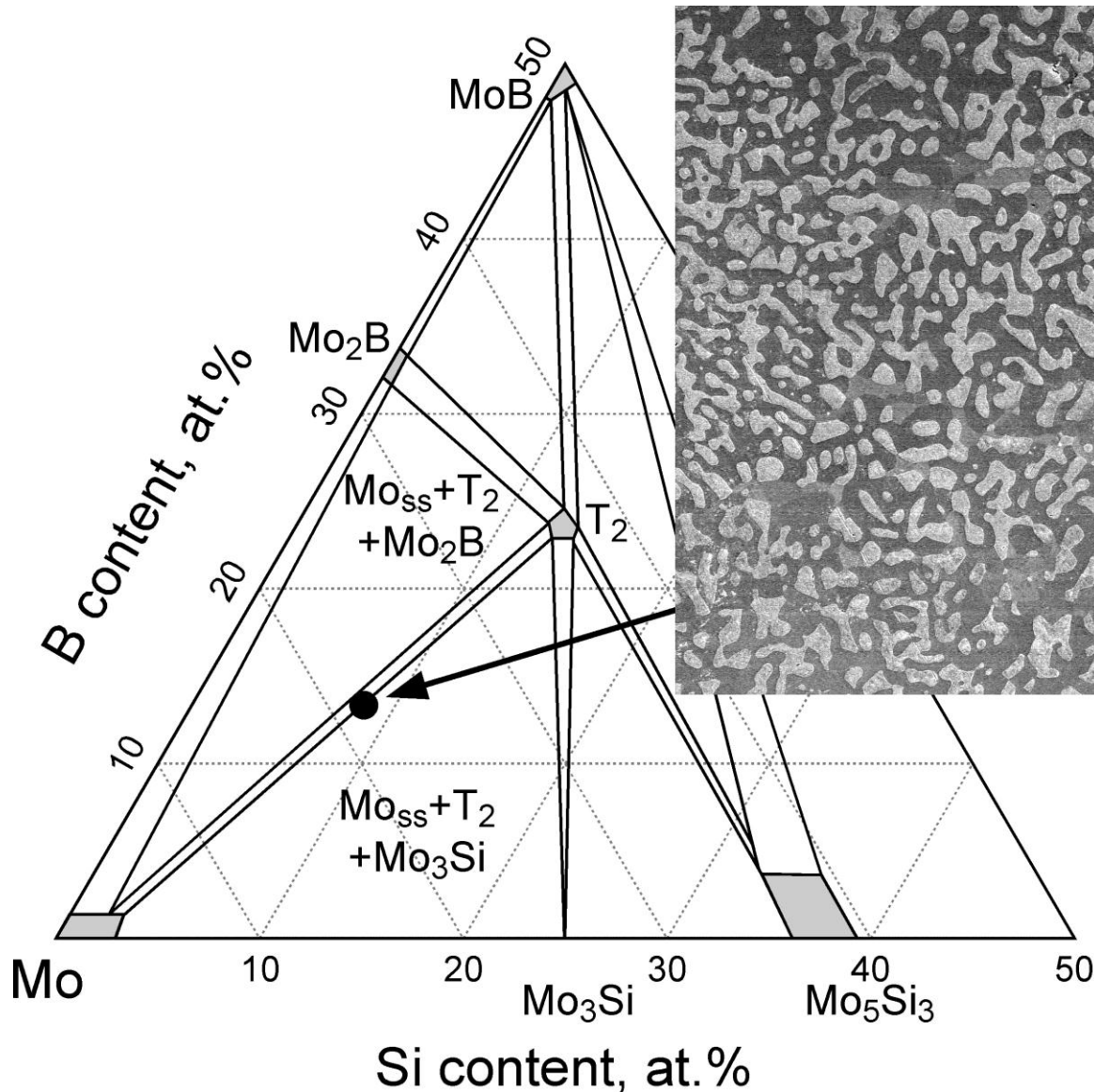


冷却による損失 → 無冷却動翼にすれば解消

無冷却動翼に必要な材料

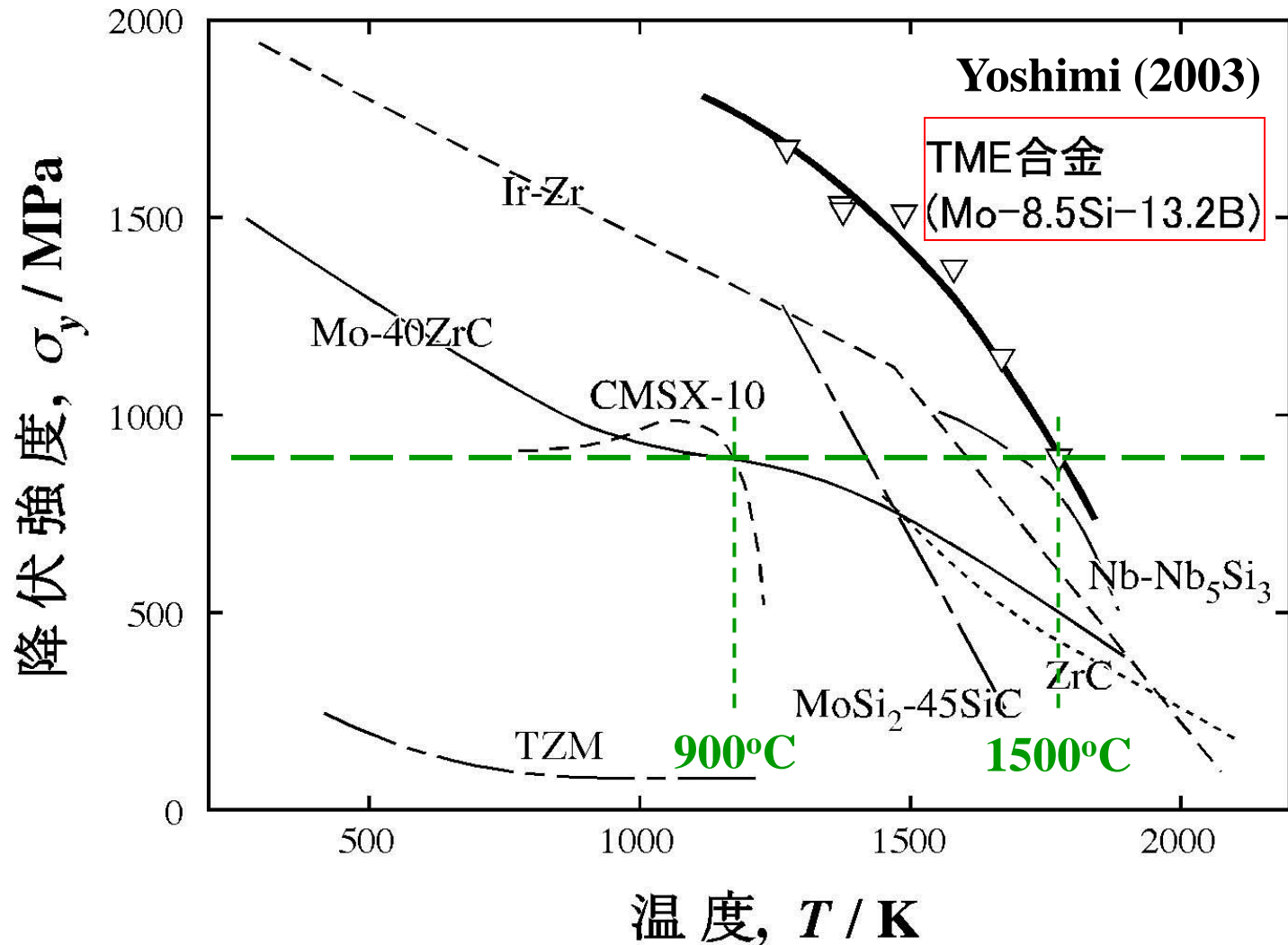
- 1500°C以上の融点
- 高温で高強度を持つ
 - Ni基超合金の900°Cと同等の1500°Cの強度
- 室温で十分な靱性の確保

Mo-T₂ (Mo₅SiB₂) 2相超高温材料



T₂: 強化相
Mo: 韌性
確保

ガスタービン用材料



CMX10 の 900°C に匹敵する 1500°C の強度

無冷却タービン翼用材料

Mo-T₂二相材料

高温強度を維持しつつ、靱性を向上する

今後の研究を期待したい

終 り に

- 火力発電プラントからのCO₂排出の削減には、プラント作動温度の高温化が不可欠
- 高温で作動可能な火力発電プラントを作るには、高温材料の高強度化が必要
- 作動温度の高温化は、省エネ、省資源の基盤技術