原子炉圧力容器の加圧熱衝撃とは何か

原子力資料情報室の連続ウエビナー

2023.05.10　オンラインセミナー

高島武雄
（原発老朽化問題研究会）

目次

1. 加圧熱衝撃とは？
2. PTS評価方法
3. 大破断LOCA
4. 事故時の冷却水流路
5. JEAC4206-2007のPTS評価方法
6. 熱伝達率算出
7. 温度分布・応力分布
8. 応力拡大係数
9. 実機への適用
10. まとめ

加圧熱衝撃とは？

①LOCA(Loss of Coolant Accident)

大口径（60～80cm）の配管破断を想定する事故（大破断)

②ECCS（Emergency Core Cooling System)

原子炉冷却材が炉心から喪失時，直ちに冷却材を炉心に注入して炉心を冷却する安全システム

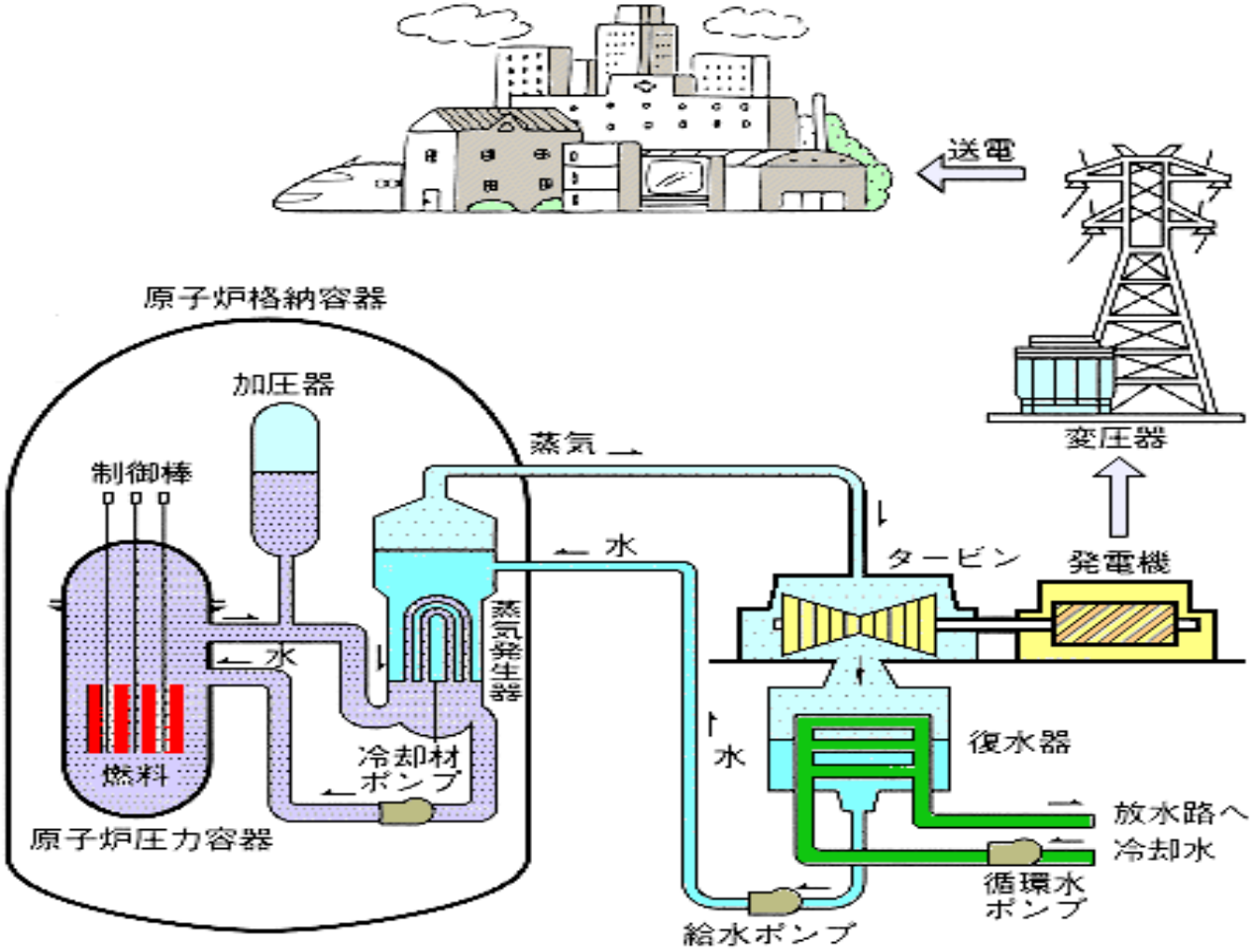
③加圧熱衝撃(Pressurised Thermal Shock):

表面急冷時に生じる熱応力（引張応力）

PTS評価法方法

- 熱衝撃に耐えられるか
- 破壊靭性曲線とPTS曲線から判定する
- 破壊靭性曲線K_{Ic} (K-One-Critical)
  - 材料の強度
  - シャルピー試験値から定める
- PTS曲線K_I (K-One)　（応力拡大係数）
  - 圧力容器の温度分布，応力分布，仮想き裂設定⇒応力拡大係数を求める

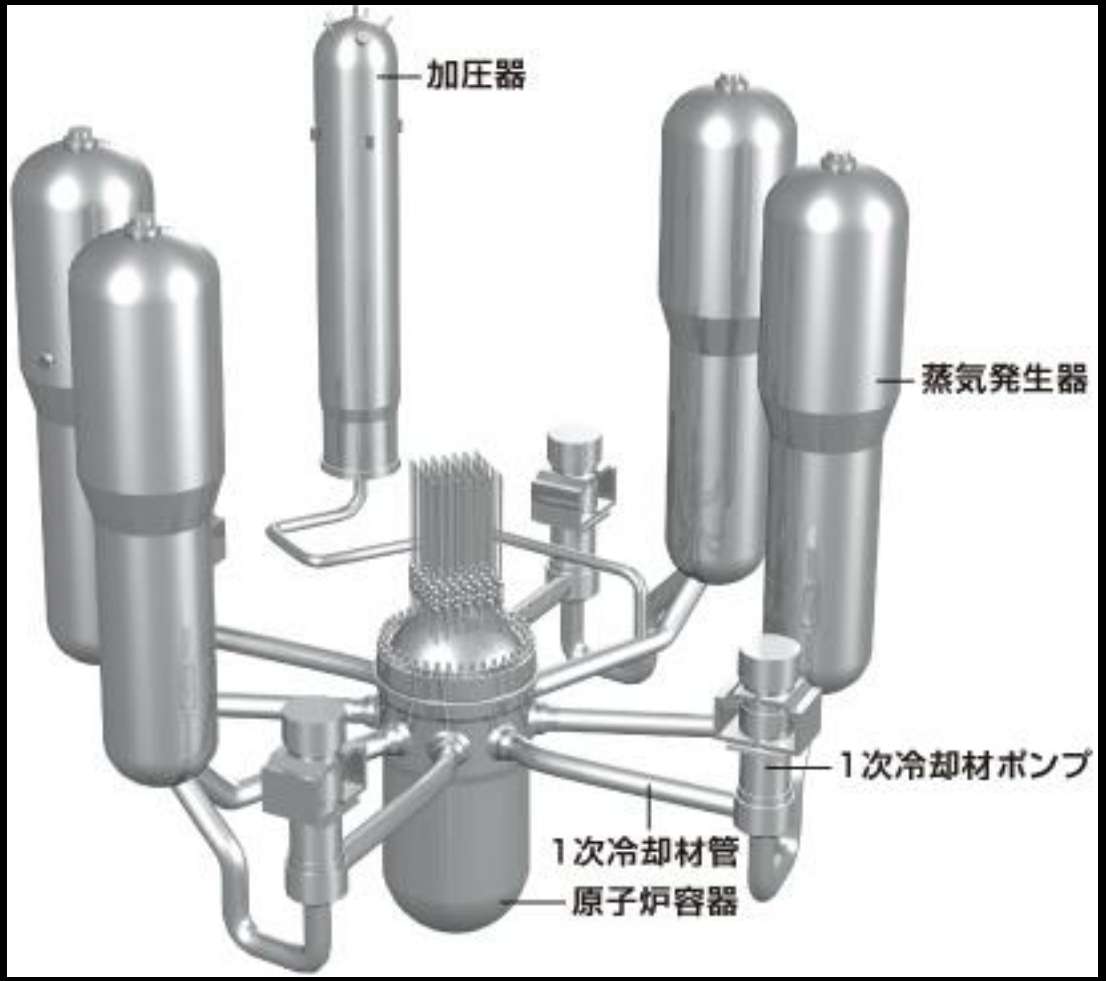
通常運転時



加圧水型原子炉（PWR）原子力発電のしくみ

［出典］ 電気事業連合会（編） 原子力図面集－1997年版－、 p99

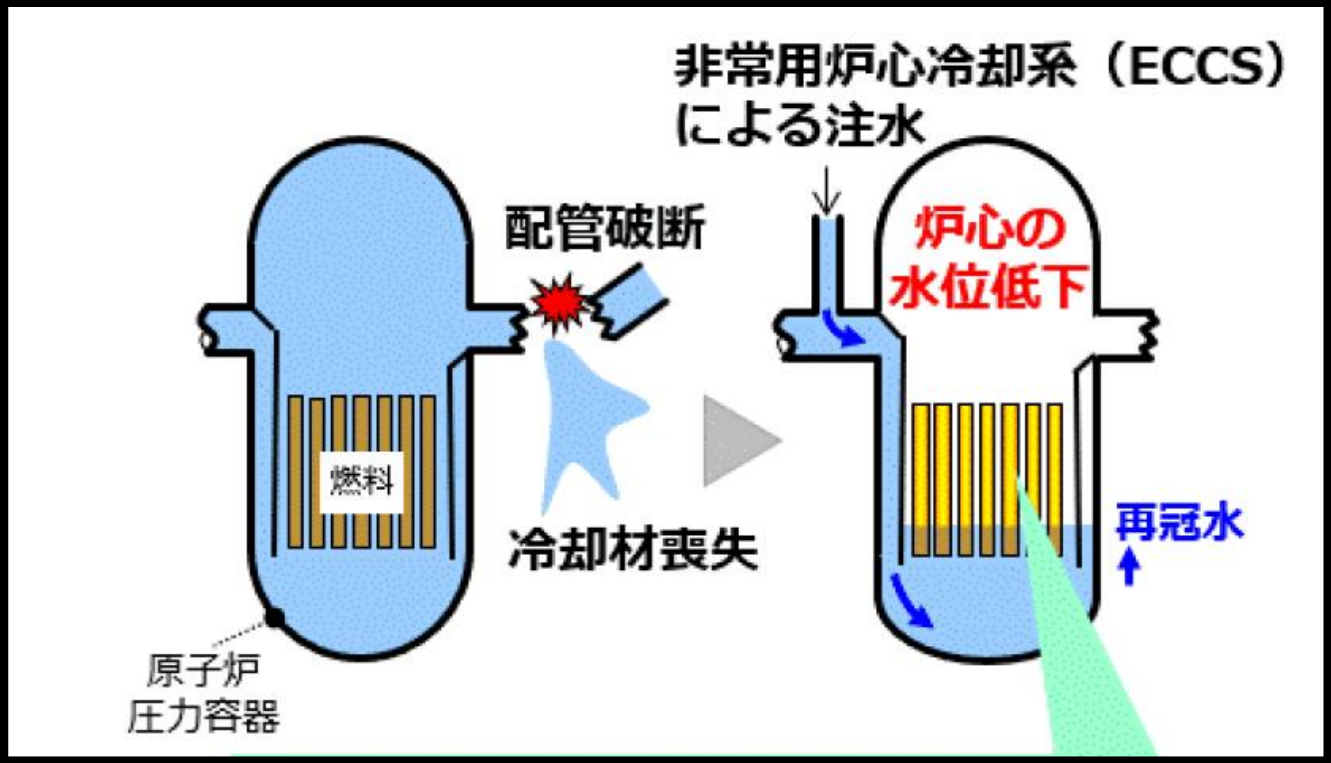
加圧水型原子力発電プラント



4ループ

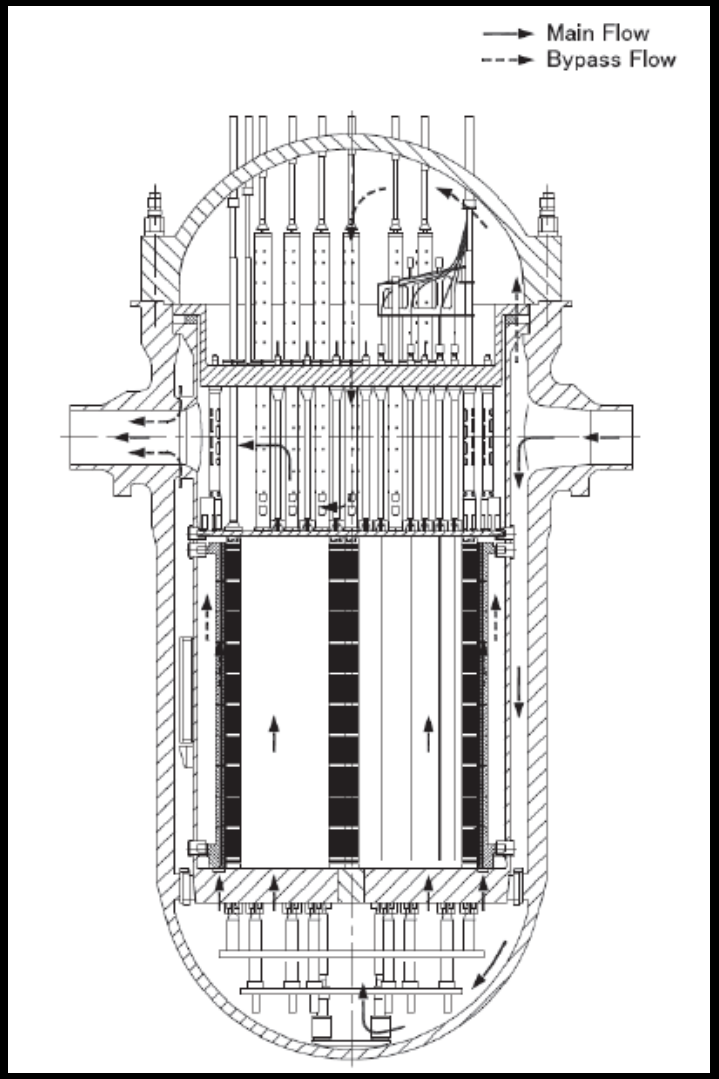
https://www.mhi.com/jp/products/energy/reactor_coolant_pump.html)

大破断LOCA



(https://www.jaea.go.jp/04/anzen/group/fsrg/LOCA.html)

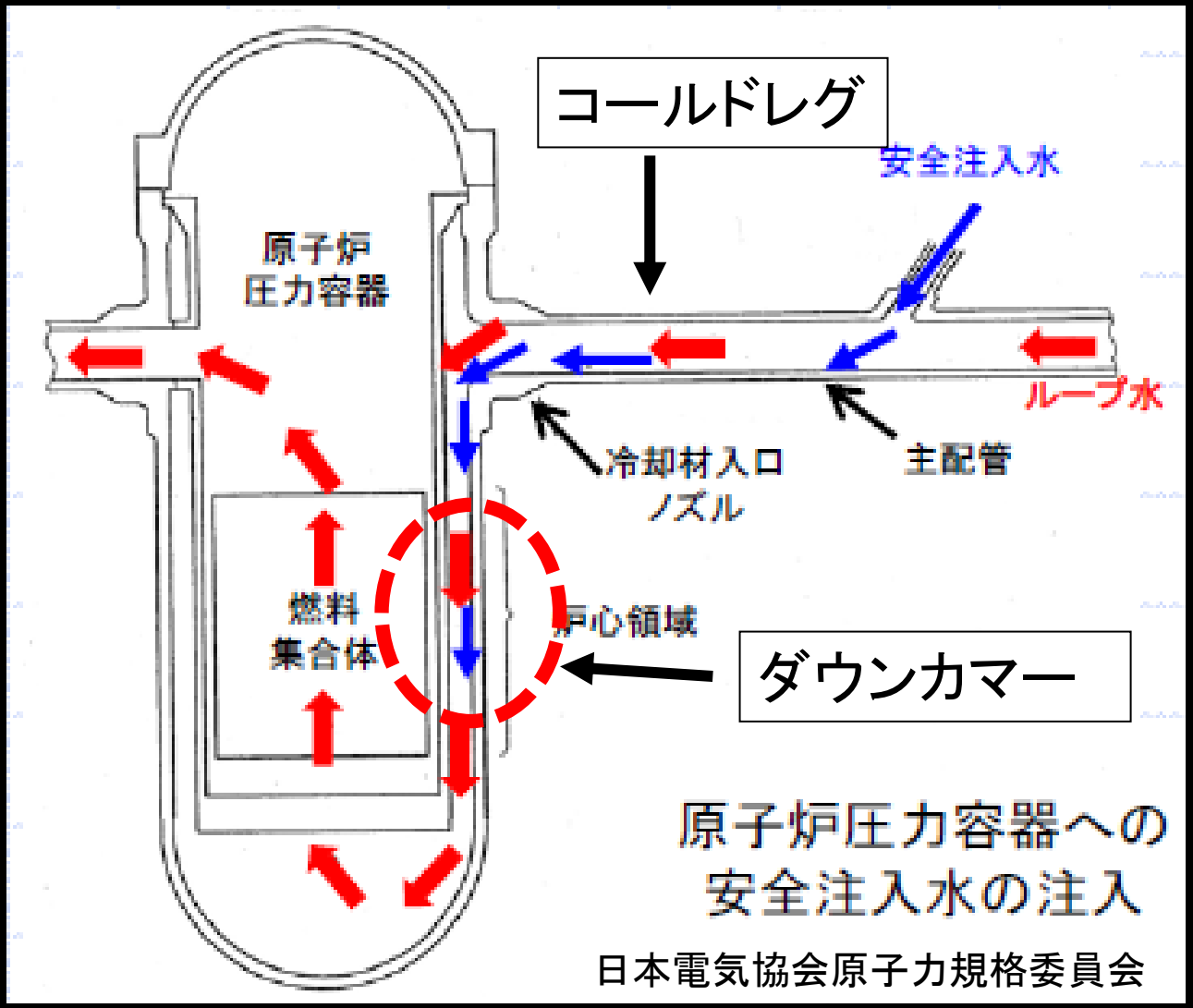
緊急炉心冷却水の流路



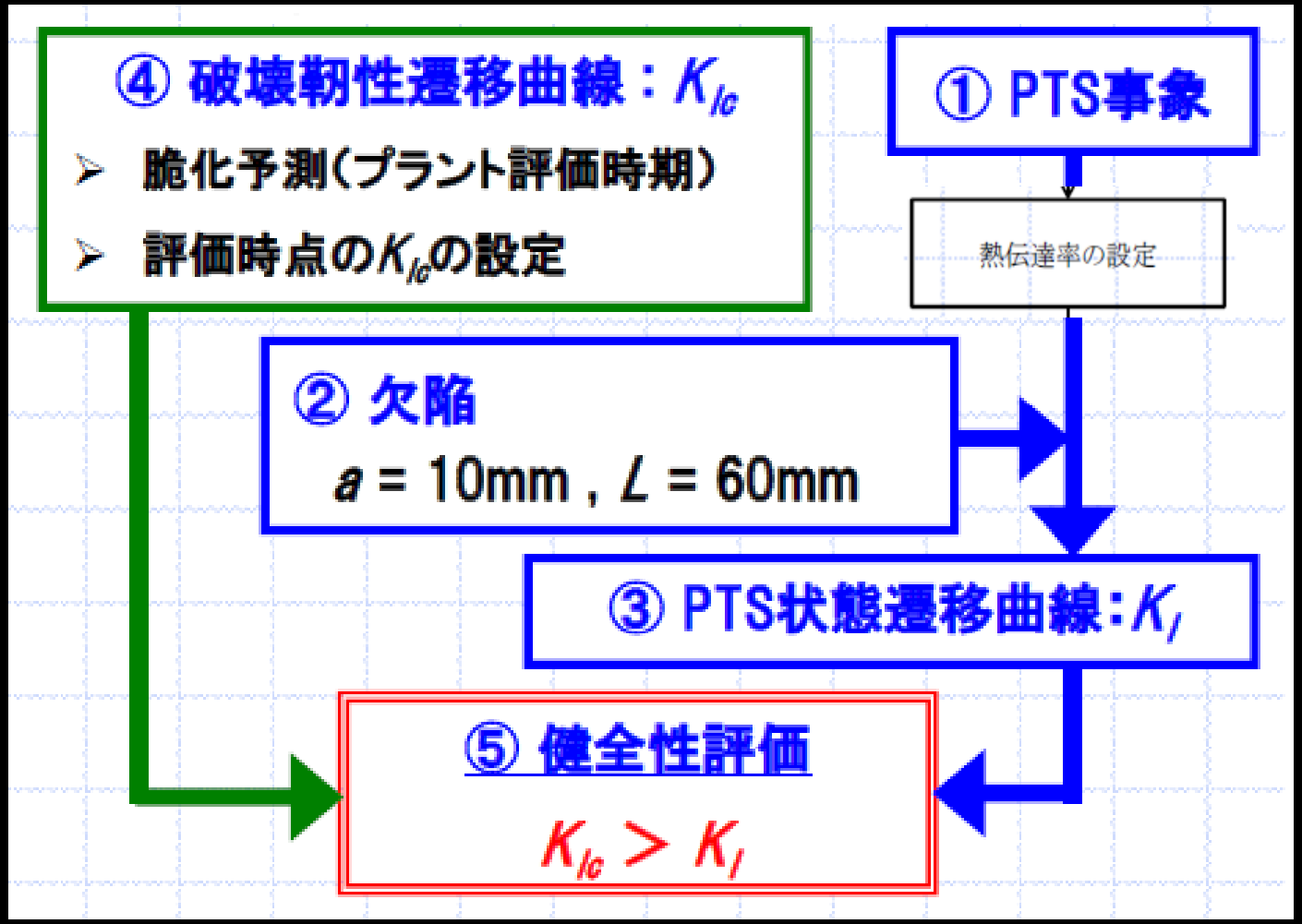
・圧力容器内の流路は
　円環
・圧力条件：
　約15.6MPaG⇒
　　0MPaGに
　ステップ状に変化
・温度条件：
　約291℃⇒約27℃に
　ステップ状に変化
・中性子照射下

“Design ControlDocument for the US-APWR”, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (2013)

緊急炉心冷却水の流路


コールドレグ
安全注入水
原子炉
圧力容器
ループ水
冷却材入口
ノズル
主配管
燃料
集合体
炉心領域
ダウンカマー
原子炉圧力容器への
安全注入水の注入
日本電気協会原子力規格委員会

JEAC4206-2007のPTS評価方法



日本電気協会原子力規格委員会

熱伝達率の無次元表示

熱伝達率h

熱移動量∝固体表面と流体の温度差×面積

$Q=h(T_s-T_f)A$

h:熱伝達率　（比例係数）

ヌセルト数　$Nu=hL/\lambda$

Nu=熱伝達率h×代表長さL／

流体の熱伝導率λ

で表わす

PTS解析時の熱伝達率の計算

・乱流強制対流熱伝達

$Nu_0=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$

（Dittus-Boelter式，流体加熱時）

・共存対流　JEAC4206-2007

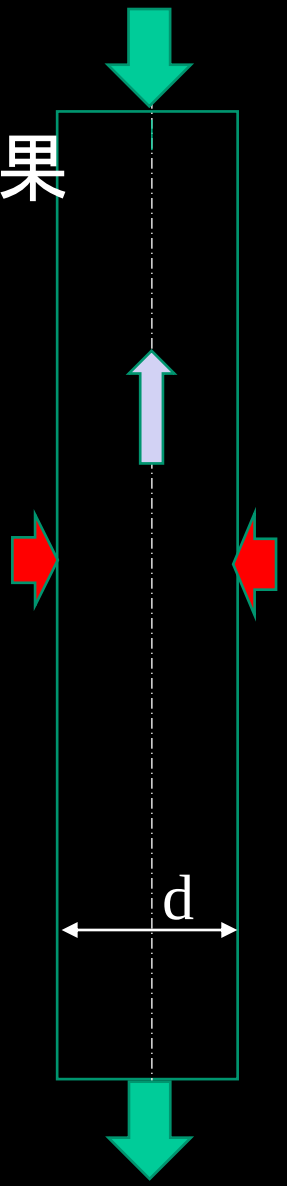
（Jackson-Fewster式）

$$\frac{Nu}{Nu_0}=\left\{1+\frac{4500Gr}{Re^{21/8}Pr^{1/2}}\right\}^{0.31}$$

Jackson-Fewster式

- d=98.4mm，L=7000mmの垂直加熱円管
- 水を下向流として行った熱伝達実験の結果
- 共存対流領域の熱伝達相関式を提案

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \left\{1 + \frac{4500Gr}{Re^{21/8}Pr^{1/2}}\right\}^{0.31}$$



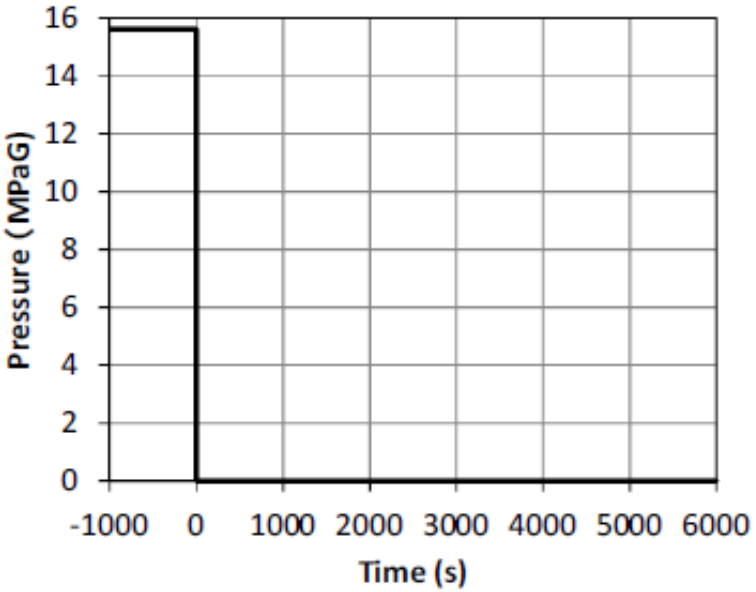
Petukhov-Kirillov式

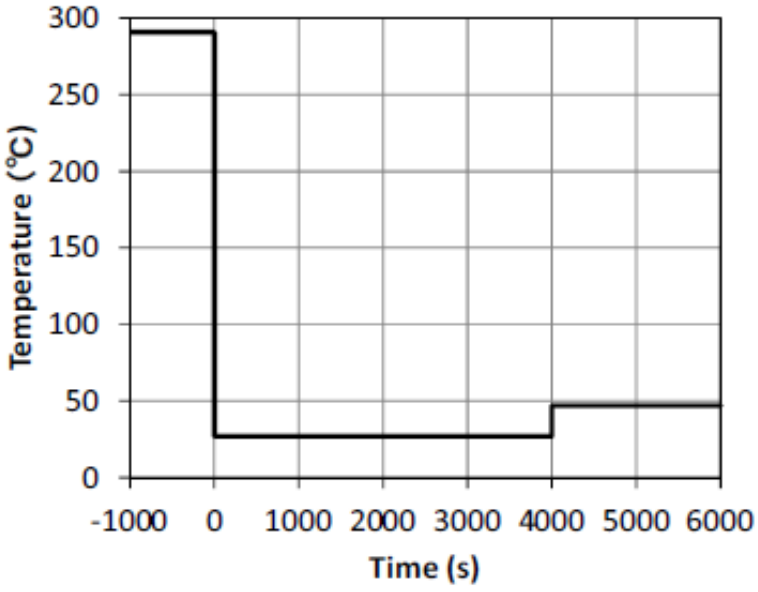
$$\mathrm{Nu}_0 = \left(\frac{f}{8}\right)\frac{RePr}{1.07 + 12.7\sqrt{f/8}\left(Pr^{2/3} - 1\right)}$$

$$(0.5 < Pr < 2000,\ 10^4 < Re < 5 \times 10^6)$$

fは管摩擦係数　$f = \dfrac{1}{(0.790 \ln Re - 1.64)^2}$

①冷却材の温度･圧力の時間変化



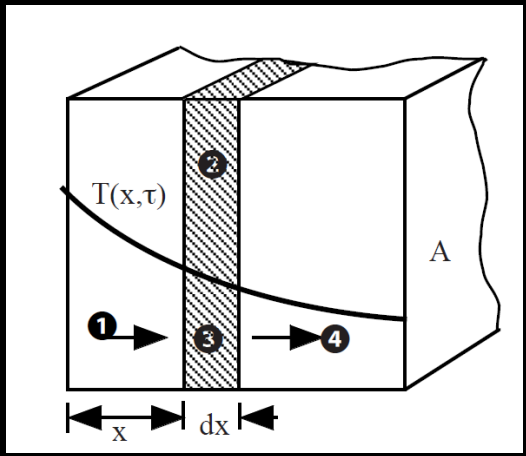


a) Large-break LOCA.

②熱伝導解析（温度分布の時間変化）

❶流入熱量
❷要素内の発生熱量
❸内部エネルギー変化
❹流出熱量

❶＋❷＝❸＋❹



熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{ k \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \dot{q}$$

(www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/netsu/heatnote/lec02.pdf)

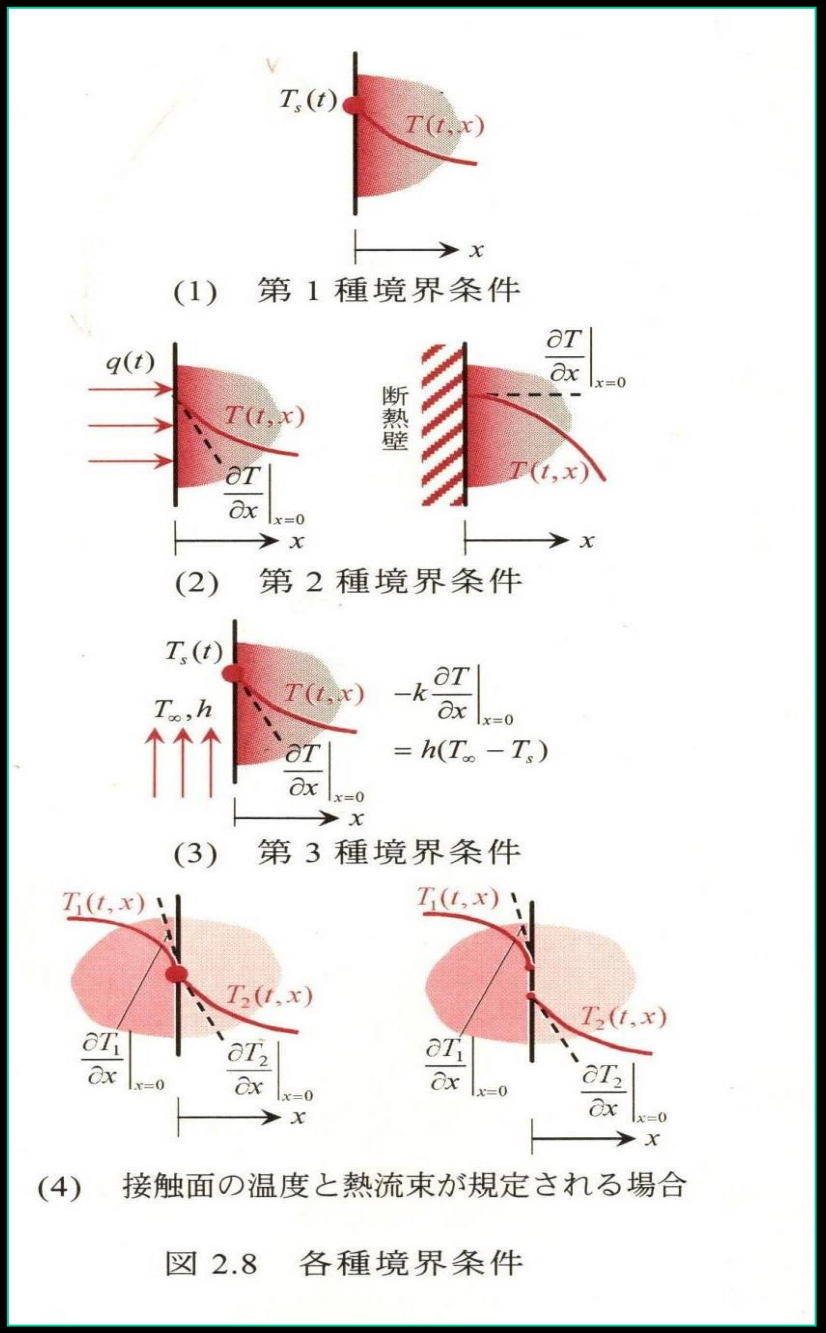
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t}$$

1次元平板，圧力容器は円筒系．発生熱量はない．

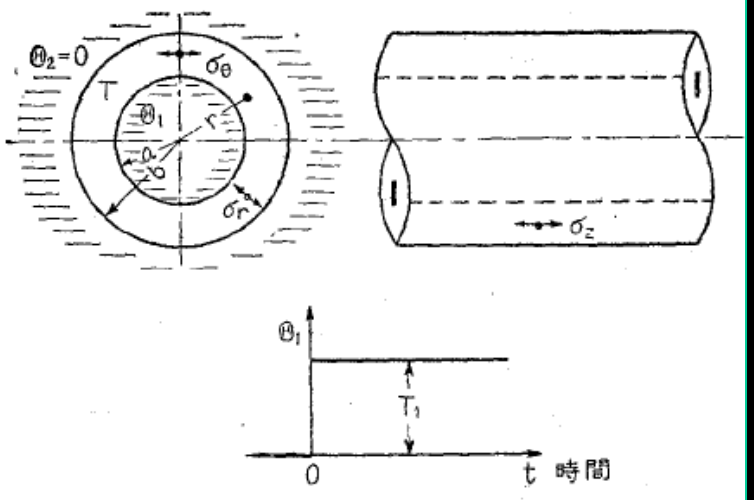
熱伝導方程式の境界条件

時間に関して
1個　　初期条件

空間に関して
2個
①内表面（対流）
②外表面（断熱）



③応力分布解析



第1図　座　標　系

・応力場
周方向応力（フープ応力）
⇒熱応力
（温度分布による）

（小泉堯，機論28巻194号,p.1315(1962)）

$$\sigma_\theta(r) = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2}\left(\frac{r^2+R_i^2}{R_o^2-R_i^2}\int_{R_i}^{R_o}\Delta T r dr + \int_{R_i}^{r}\Delta T r dr - \Delta T r^2\right)$$

ここで α, E, ν は円柱材料の線膨張係数，縦弾性係数およびポアソン比

計算条件（温度分布）

分割数

母材40分割　刻み幅Δr=5mm

厚さ200mm 3ループ

母材34分割　　刻み幅Δr=5mm

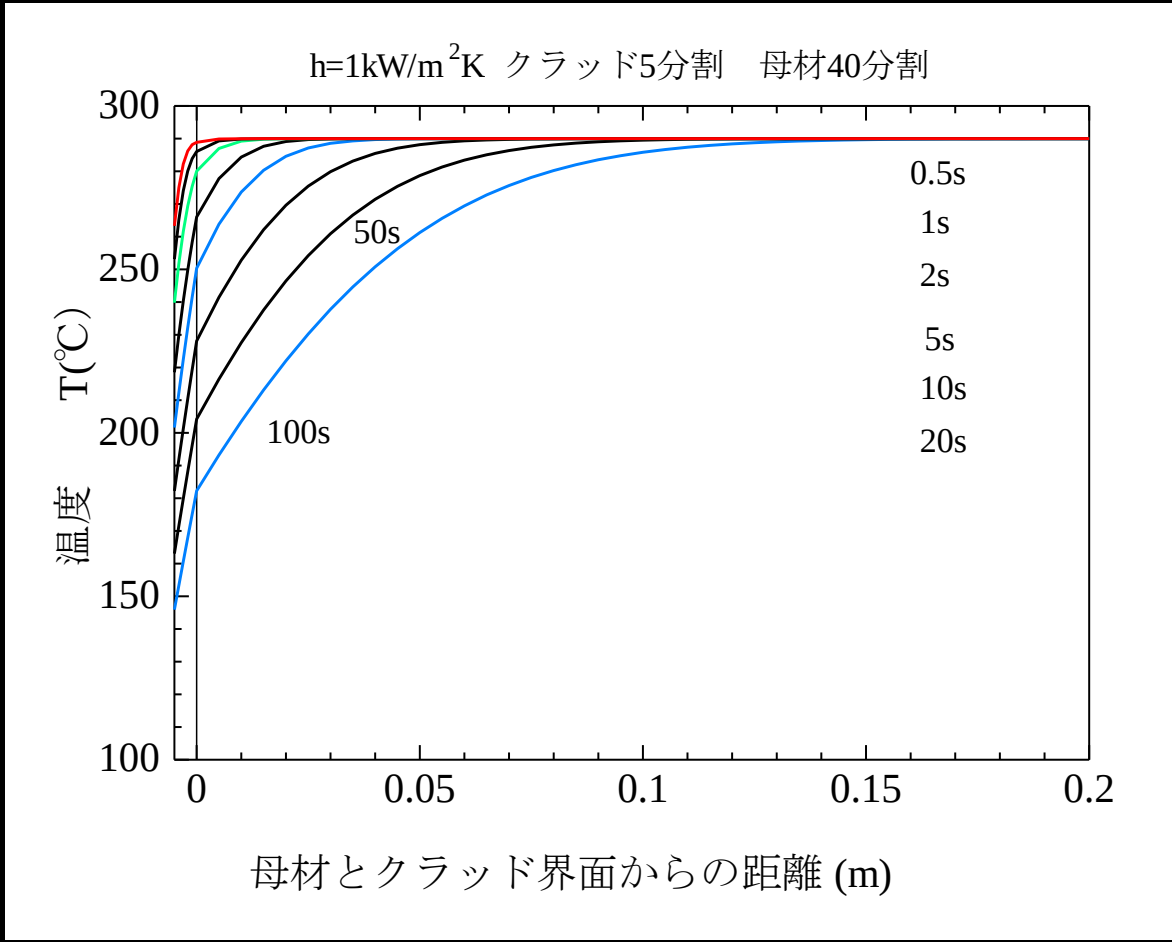
厚さ170mm 2ループ

クラッド5分割　　Δr_c=1mm

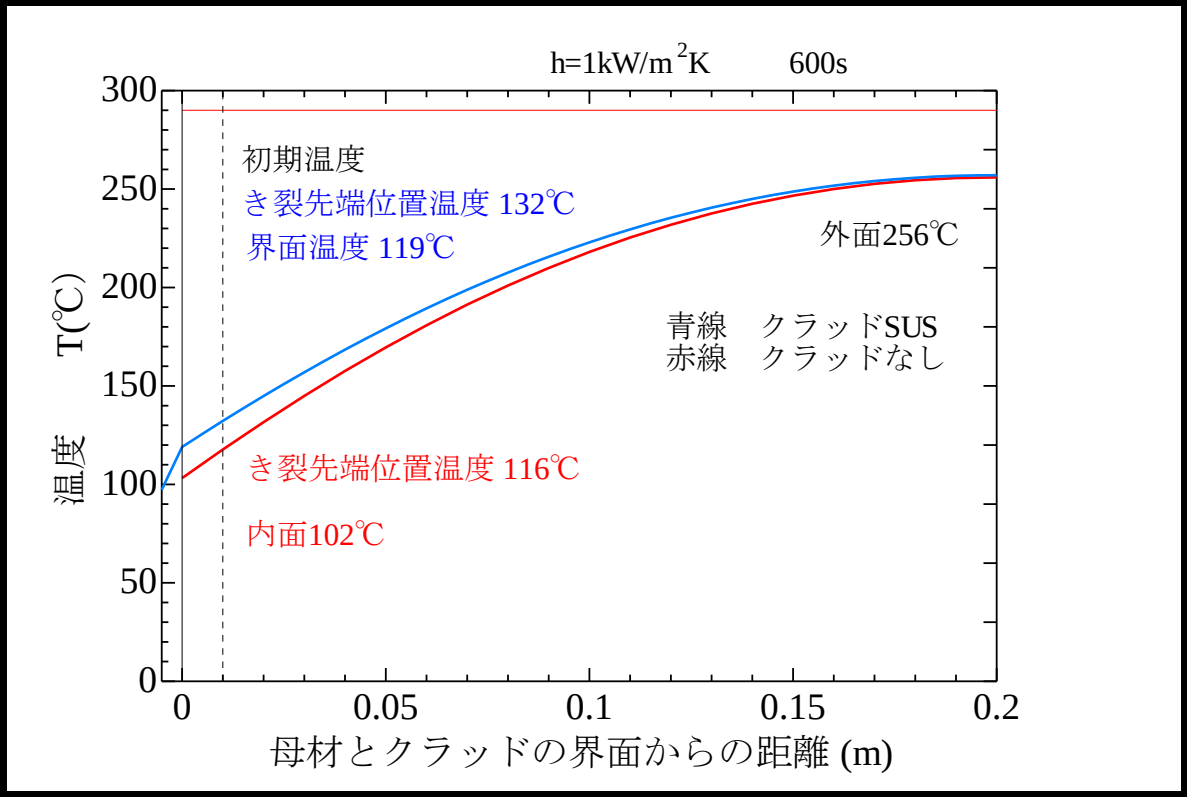
時間刻み

Δt=0.05 sec

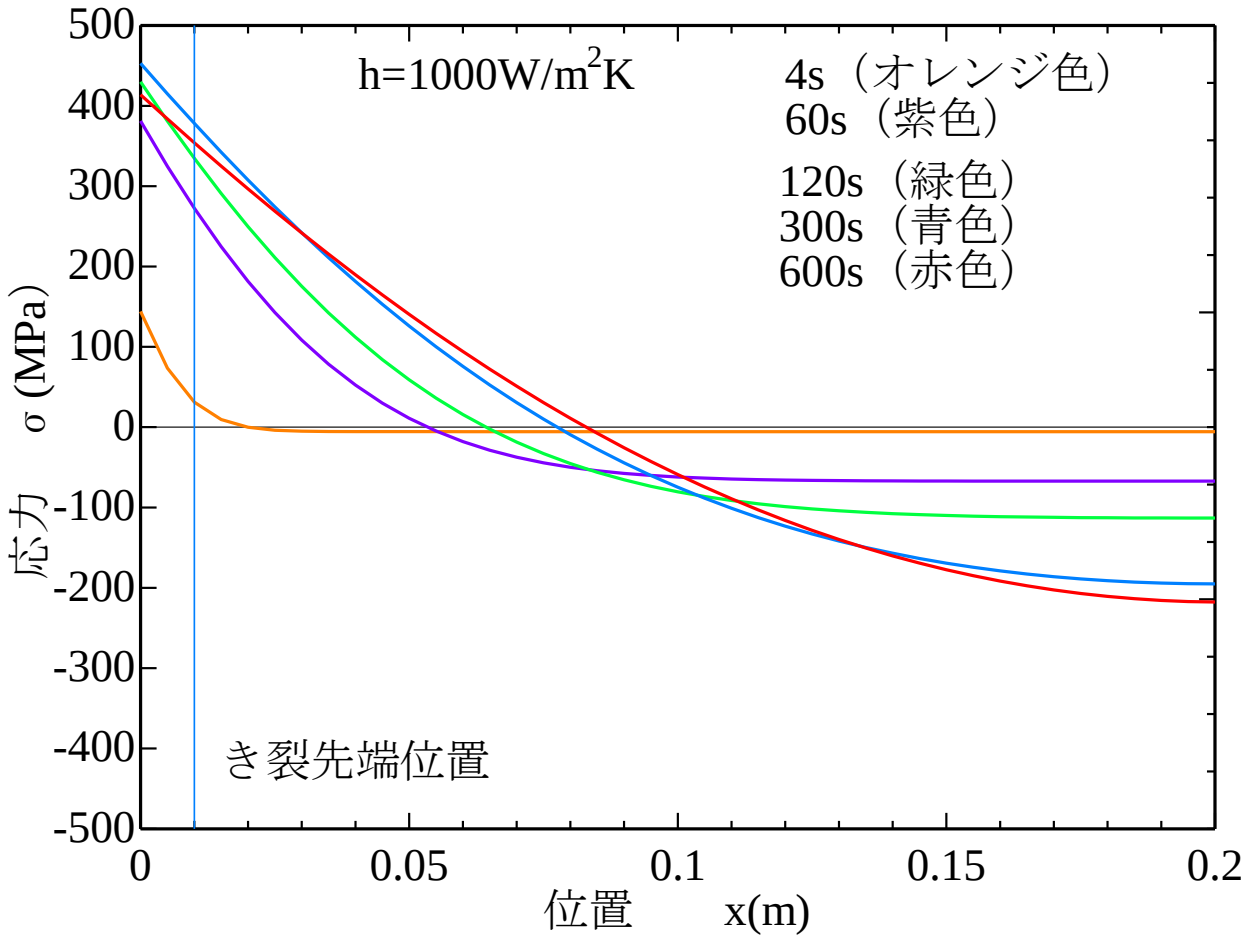
圧力容器の温度分布時間変化 (t=0～100sec)



圧力容器温度分布 (t=600sec）h=1kW/m²K

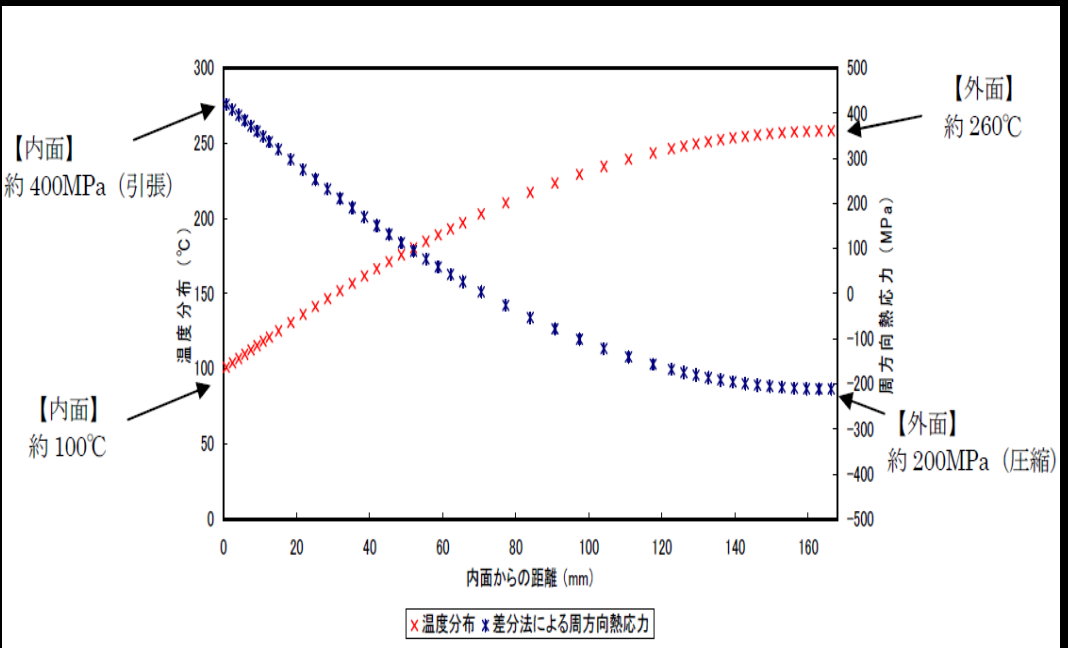


計算結果（応力分布）

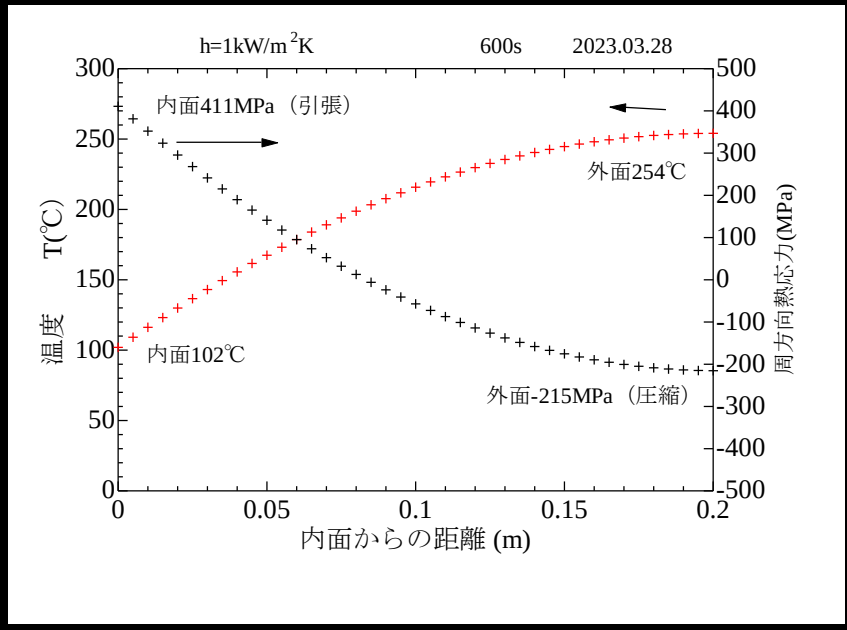


2023.03.20

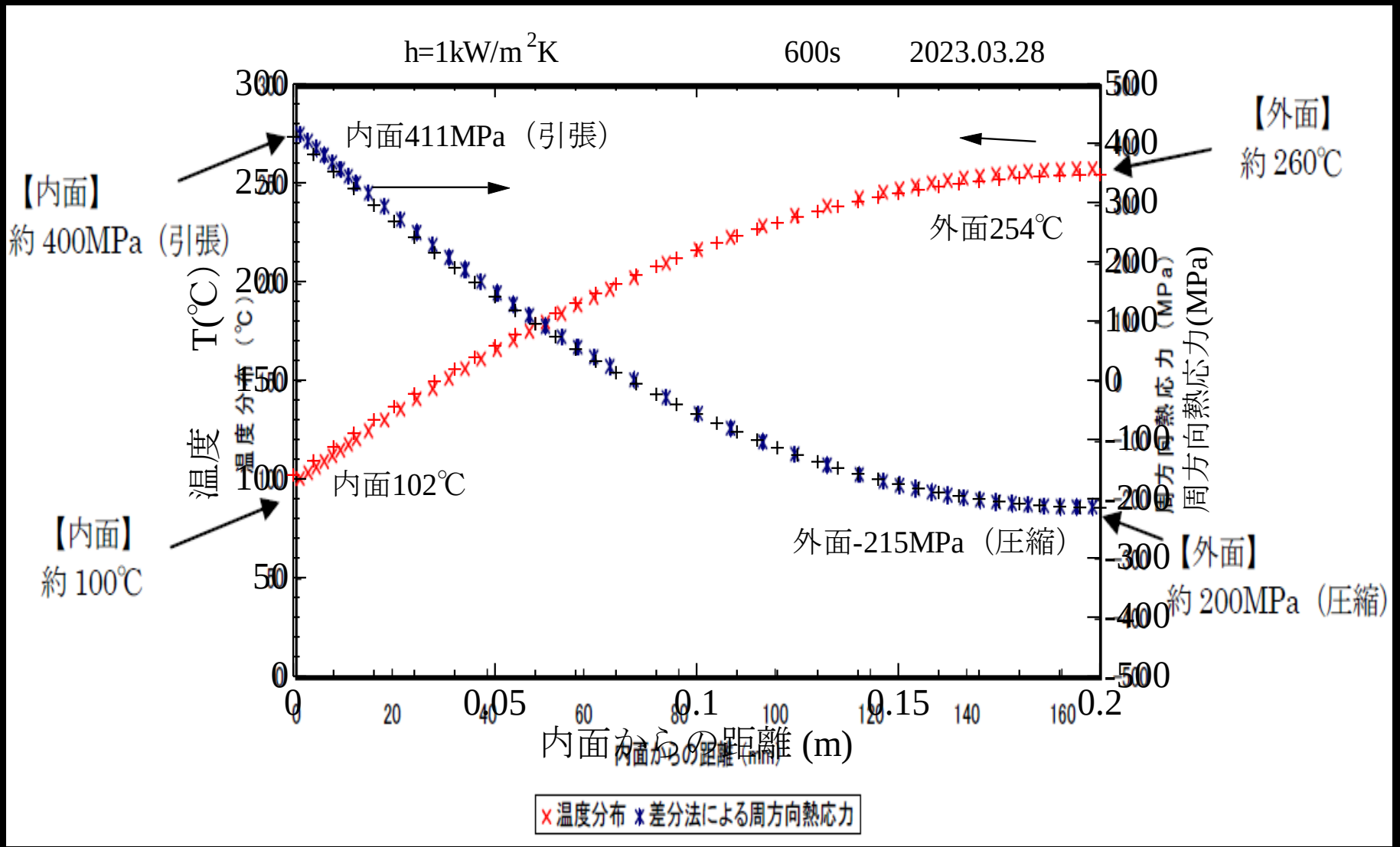
温度分布と応力分布のクロスチェック



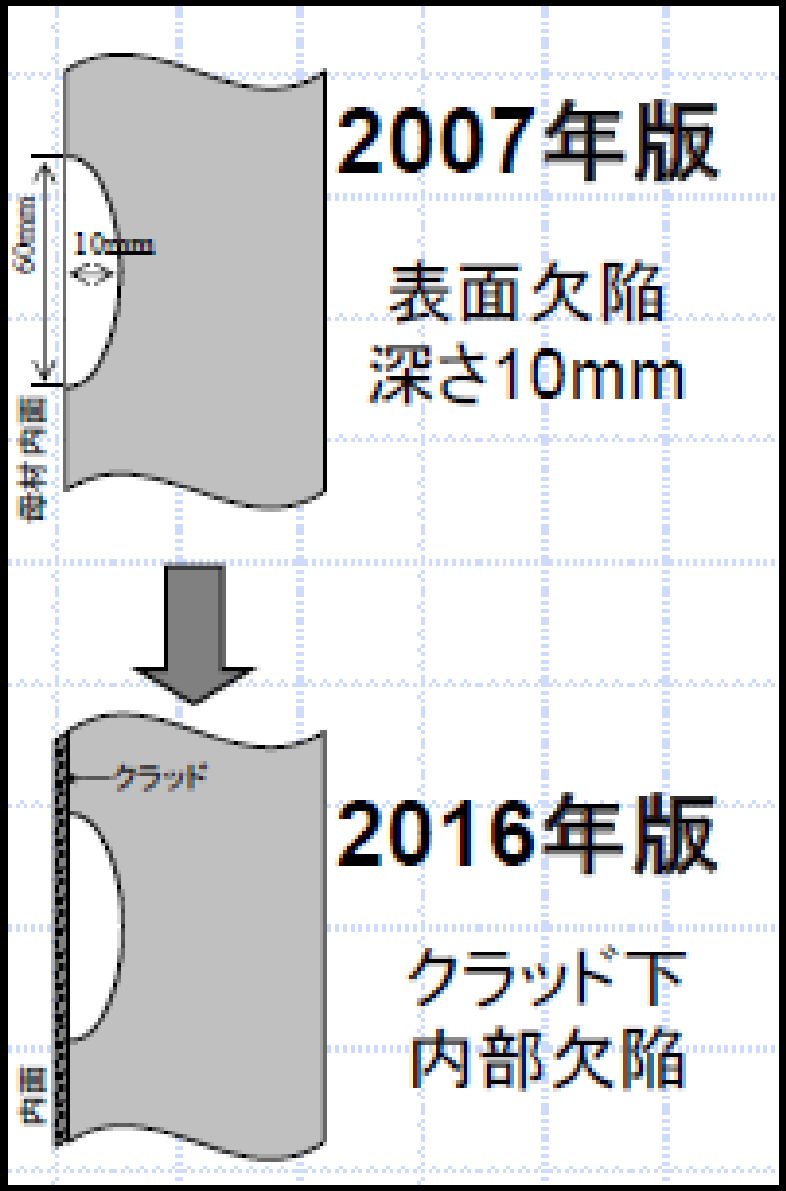
九州電力



本解析


h=1kW/m 2K
600s
2023.03.28
内面411MPa（引張）
外面254℃
内面102℃
外面-215MPa（圧縮）
【内面】
約 400MPa（引張）
【内面】
約 100℃
【外面】
約 260℃
【外面】
約 200MPa（圧縮）
温度 T(℃)
周方向熱応力(MPa)
内面からの距離 (m)
温度分布
差分法による周方向熱応力

仮想き裂　表面き裂



日本電気協会
原子力規格委員会

④応力拡大係数（PTS状態遷移曲線）の算出

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}\{S_0G_0 + S_1G_1 + S_2G_2 + S_3G_3\}$$

ここで

Q は，第 2 種楕円積分で，近似的に $Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$

G_0～G_3:影響係数　（き裂最深部），
a:き裂深さ，　2c:半楕円き裂長軸，　t:板厚

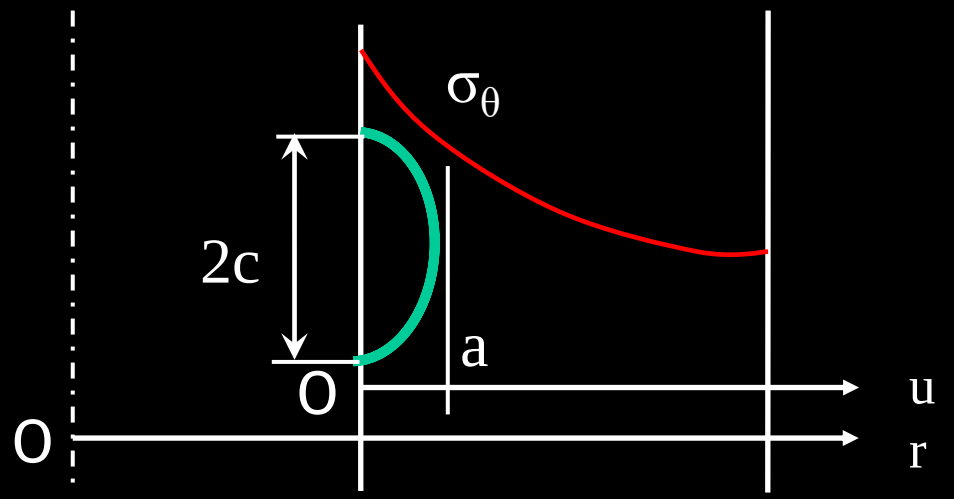
$G_o = 1.0124 + 0.3339(a/t) + 0.3944(a/t)^2$

$G_1 = 0.678 + 0.0706(a/t) + 0.22784(a/t)^2$

$G_2 = 0.5129 - 0.0039(a/t) + 0.1722(a/t)^2$

$G_3 = 0.4420 - 0.0450(a/t) + 0.1500(a/t)^2$

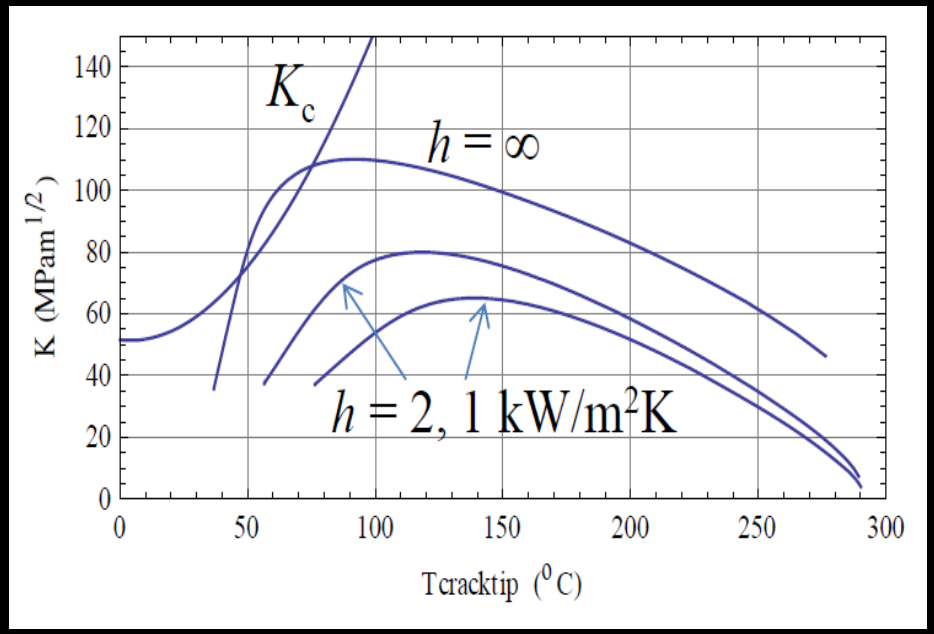
応力拡大係数K_I（続き）



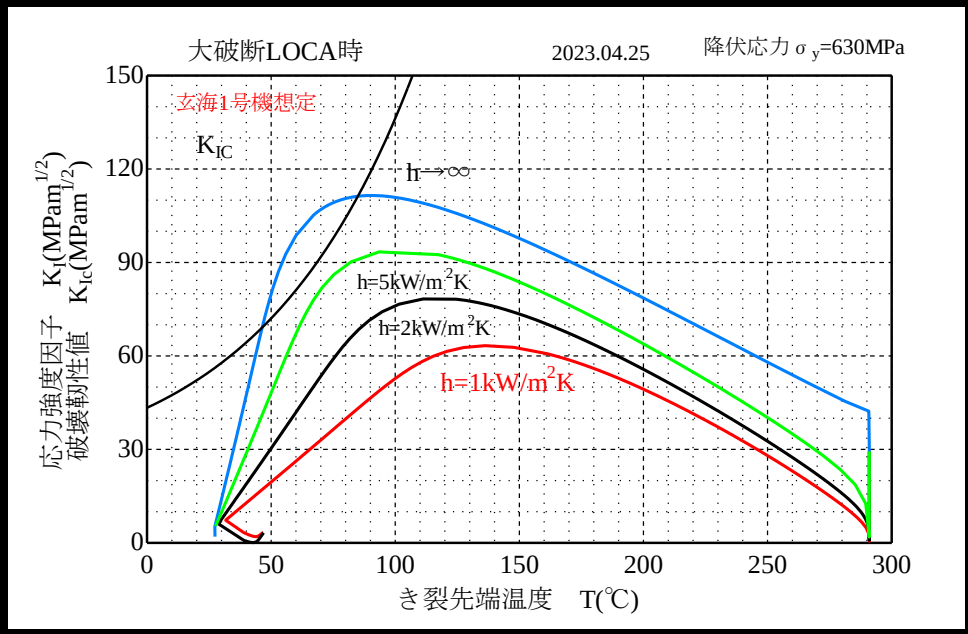
S_0～S_3:重み係数（応力分布を3次式に近似したときの係数）

$$\sigma_\theta\left(\frac{u}{a}\right) = S_0 + S_1\left(\frac{u}{a}\right) + S_2\left(\frac{u}{a}\right)^2 + S_3\left(\frac{u}{a}\right)^3$$

飯井の結果と比較（クロスチェック）



飯井俊行，玄海1 号機PTS 解析試算，第14回高経年化技術評価に関する意見聴取会　資料8　(2012/05/09)

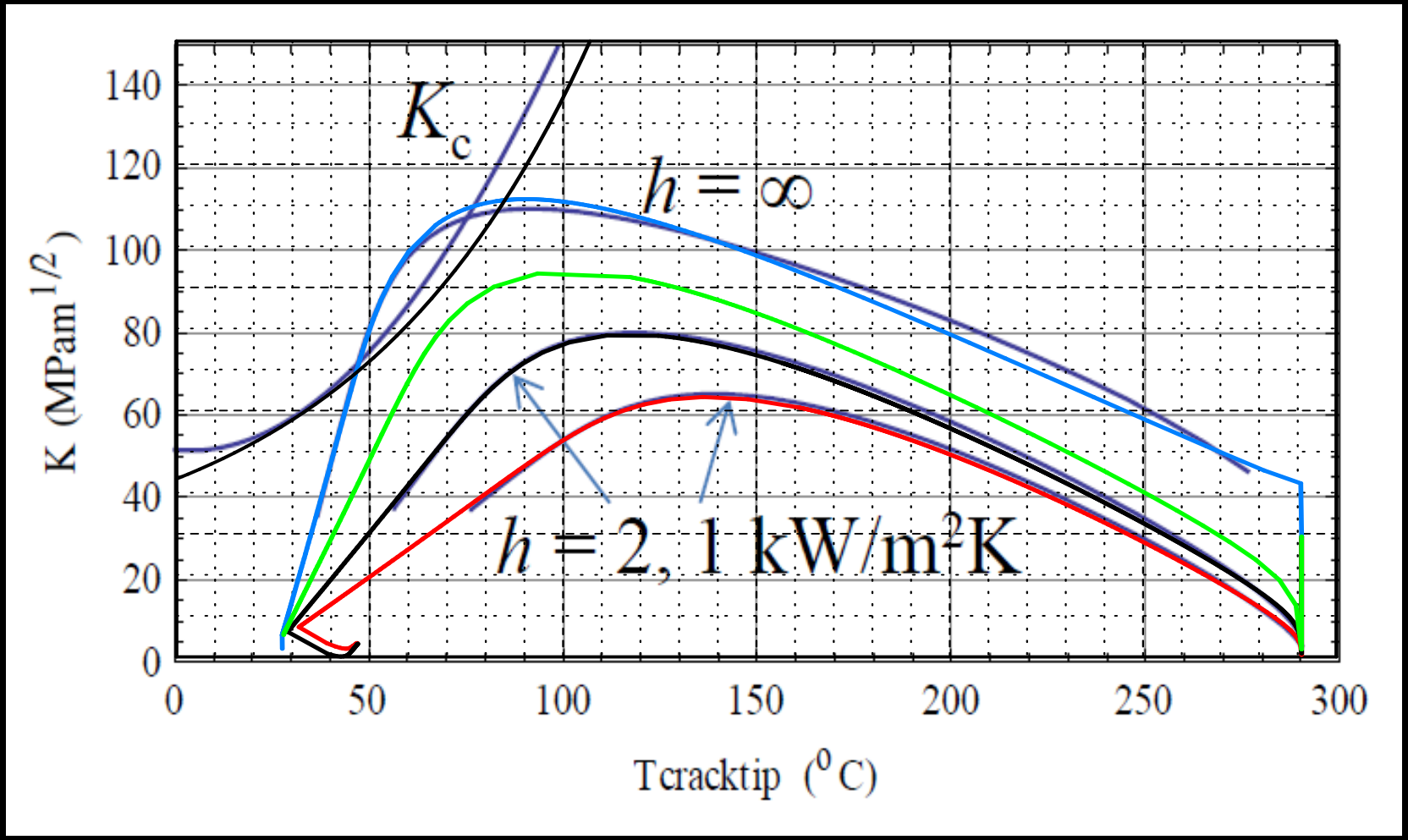


本解析

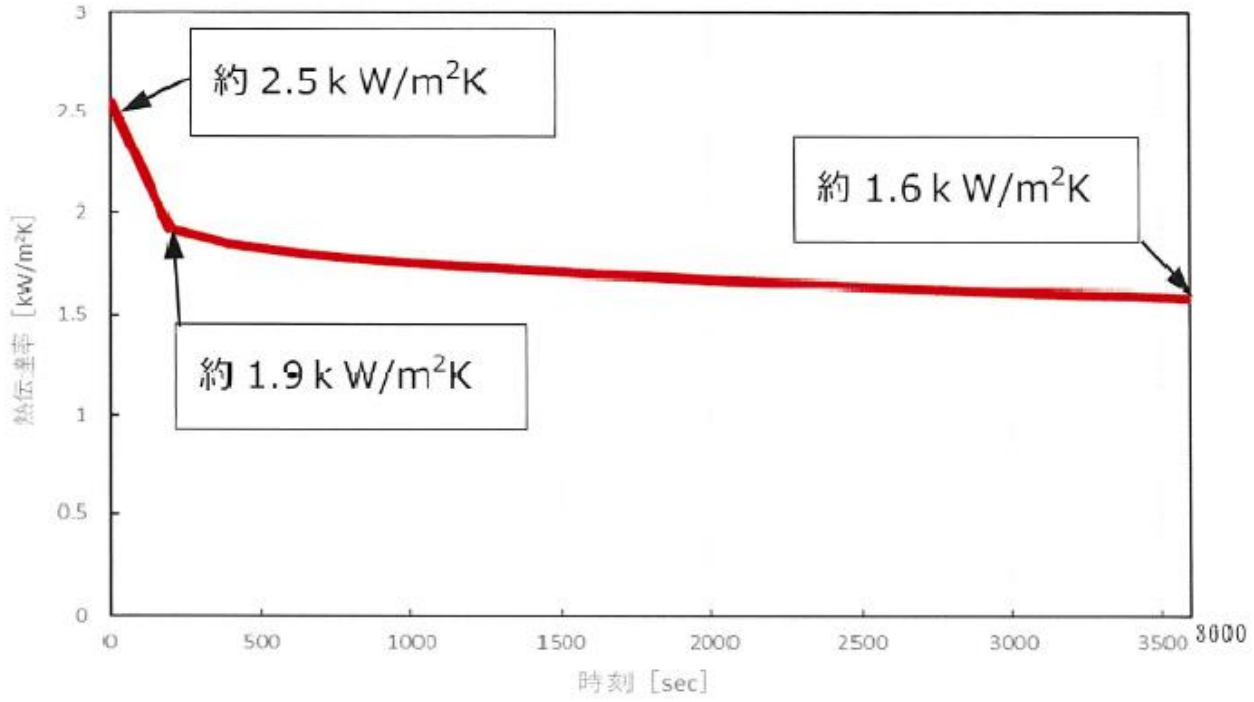
重ねてみると…

飯井の計算と比較

高浜1号機60年時点K_{IC}



関西電力の用いた熱伝達率

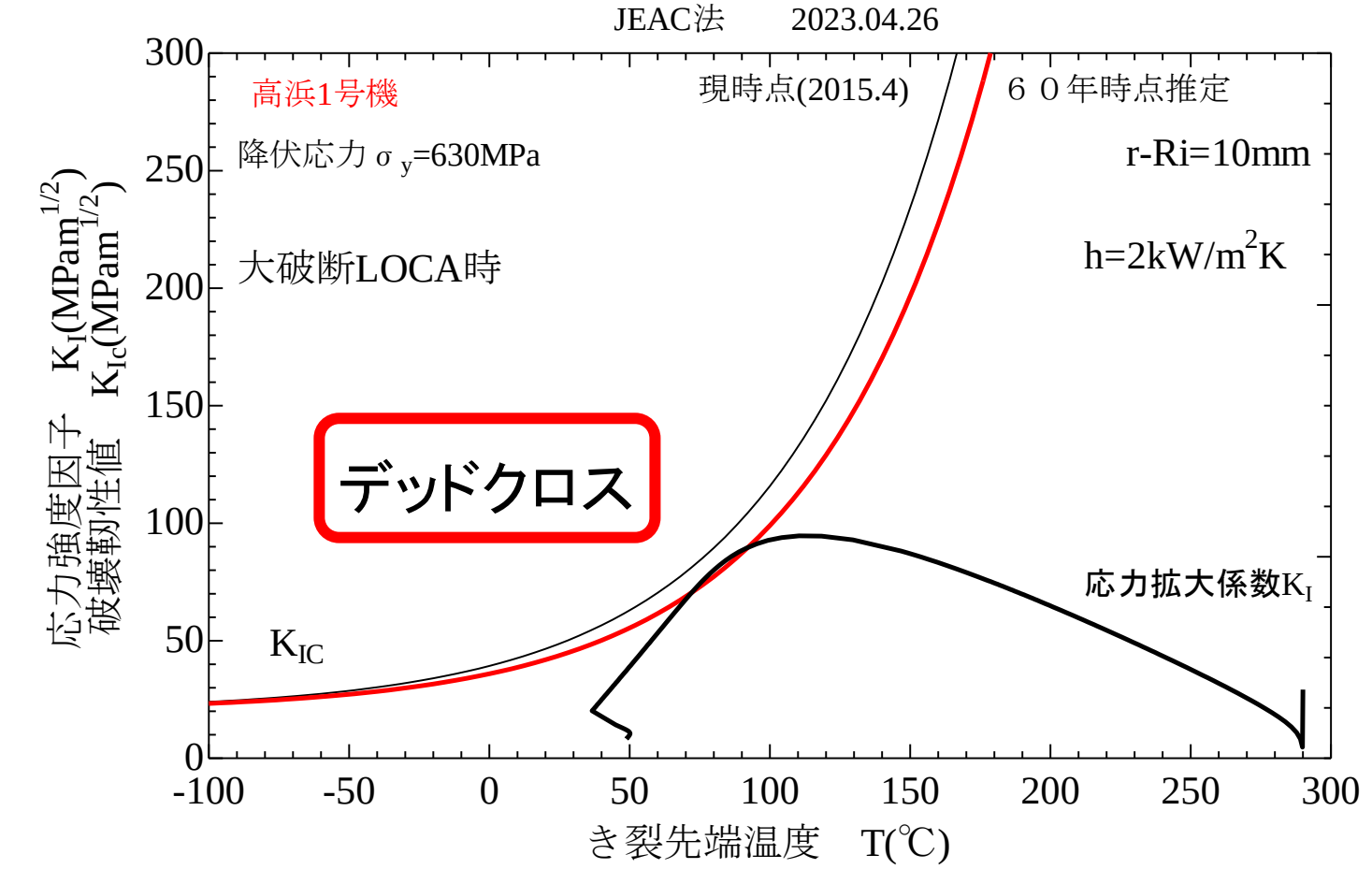


【図表８　大破断ＬＯＣＡにおける再解析時の熱伝達率】

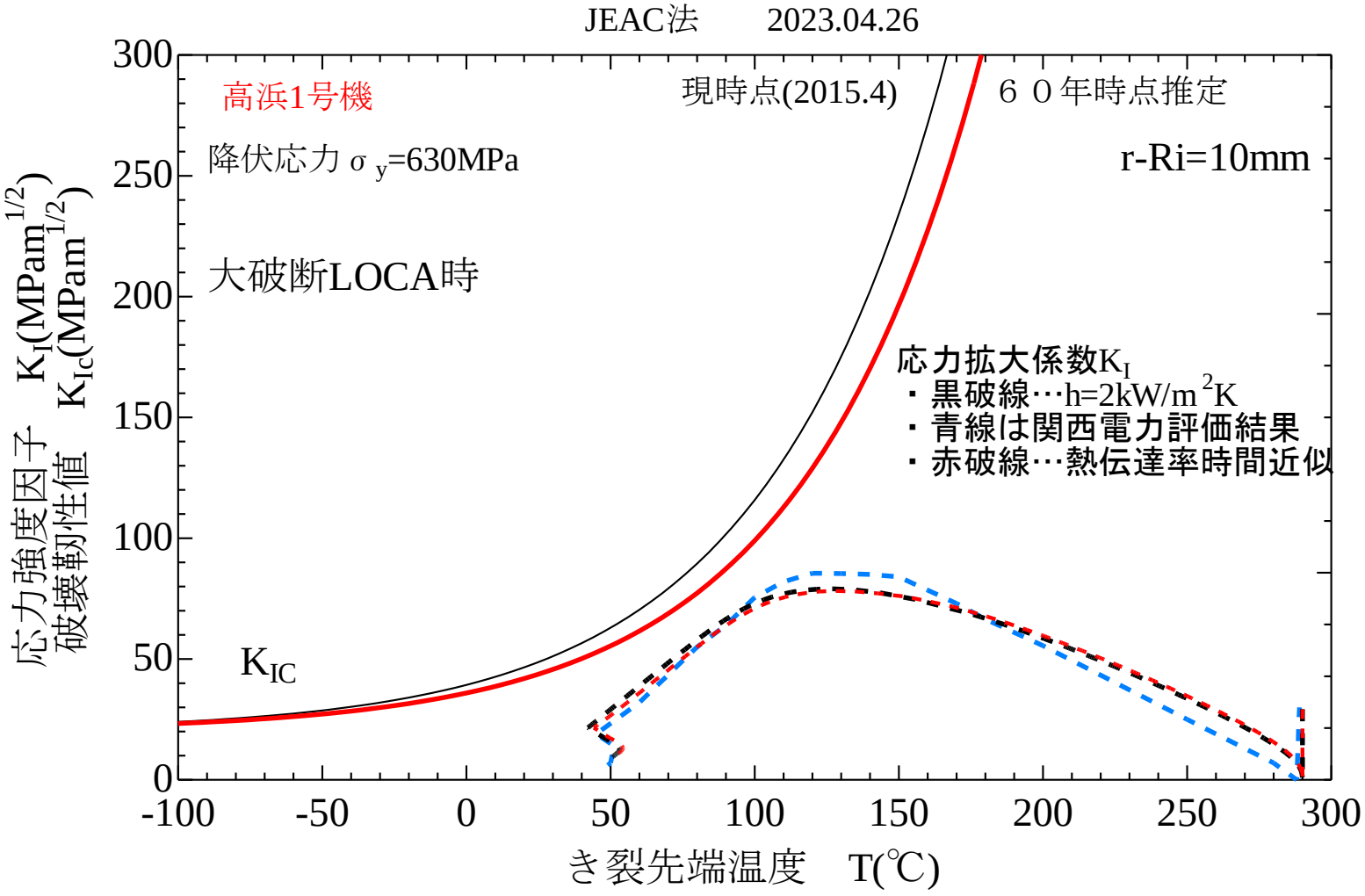
計算値．実験による確認なし

平均するとほぼ2kW/m²K

PTS評価（高浜1号機の場合）
h=2.0kW/m^{2}K



PTS評価（高浜1号機の場合）
h=2kW/m²Kと時間の関数に近似



まとめ

(1)PTSについて解説した.

(2)JEAC4206-2007に基づいてPTS曲線を計算した.

(3)高浜１号機についてPTS評価を行った

⇒規格にあるようにクラッドを考慮しない場合のPTS評価の結果は，熱伝達率2.0kW/m^{2}Kで，K_IはK_{Ic}を上回ることが明らかになった.

(4)評価上重要な物理量である，大破断LOCA時の熱伝達率の実験値がないことは，大きな問題点である.

クラッドの扱い

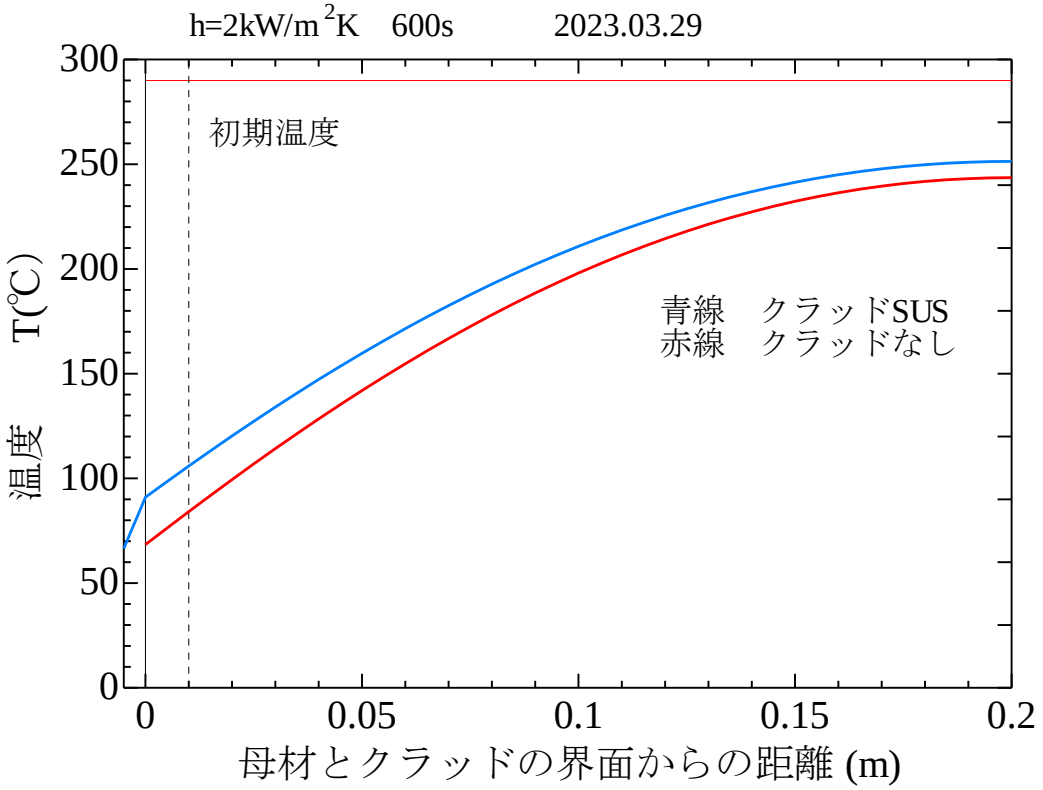
【電力事業者】

- 温度分布はクラッドを考慮して計算
- 応力拡大係数はクラッドを取り除いて計算

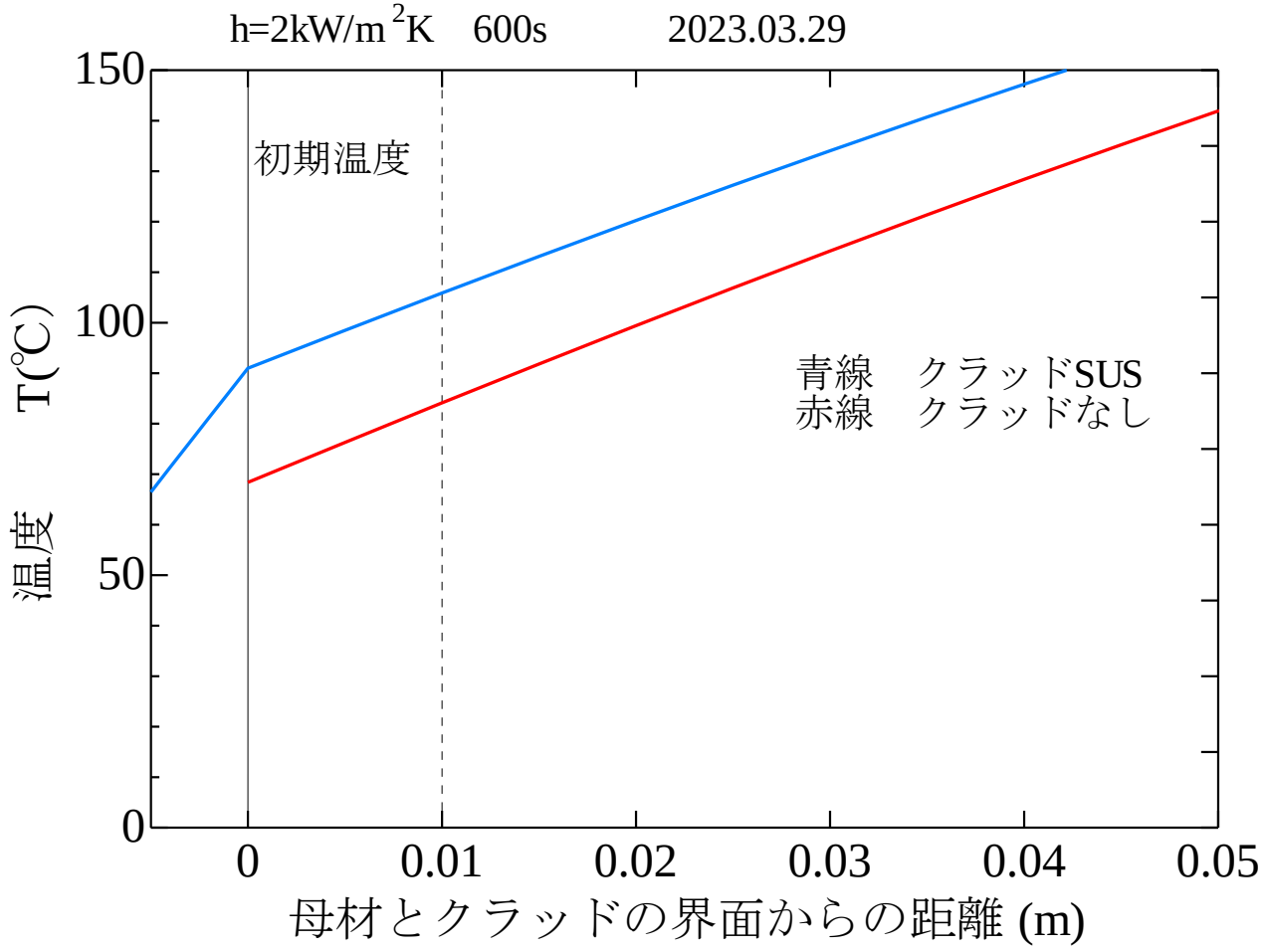
【疑問点】

- このようなモデルの学術論文の存在を知らない
- JEAC4206-2007にはクラッドの記述なし

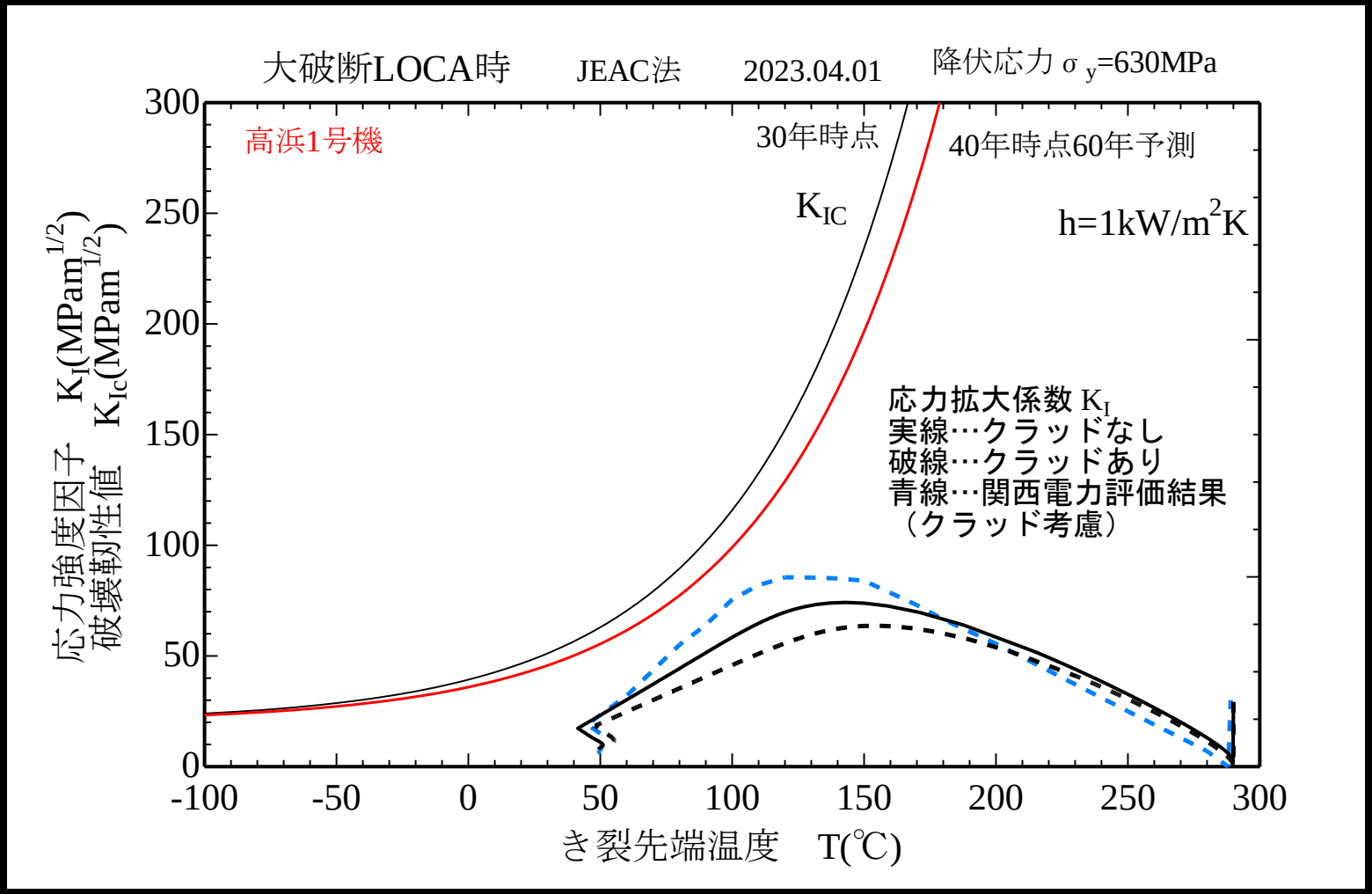
圧力容器温度分布
(t=600sec) h=2kW/m²K



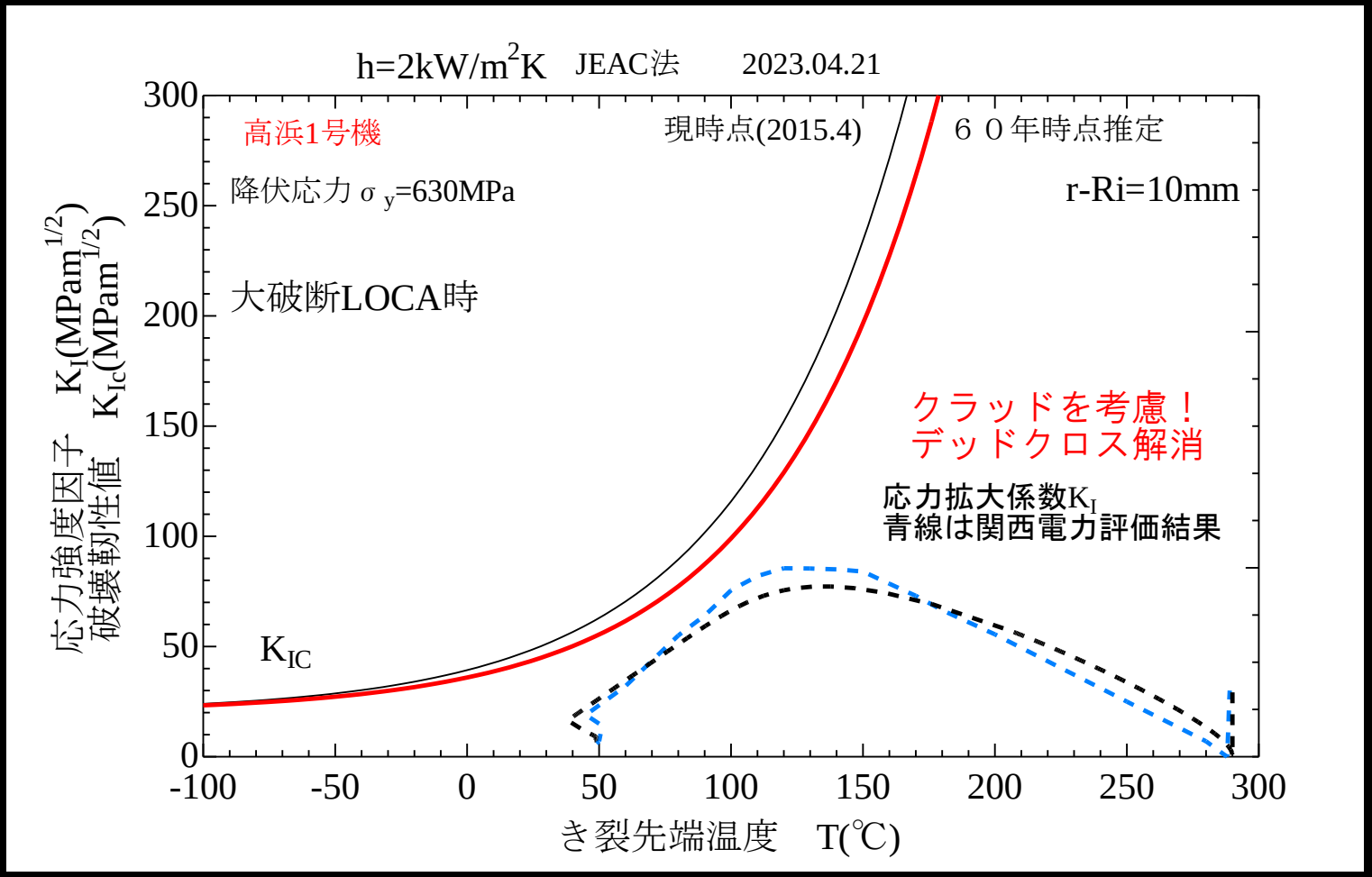
圧力容器温度分布詳細（t=600sec）



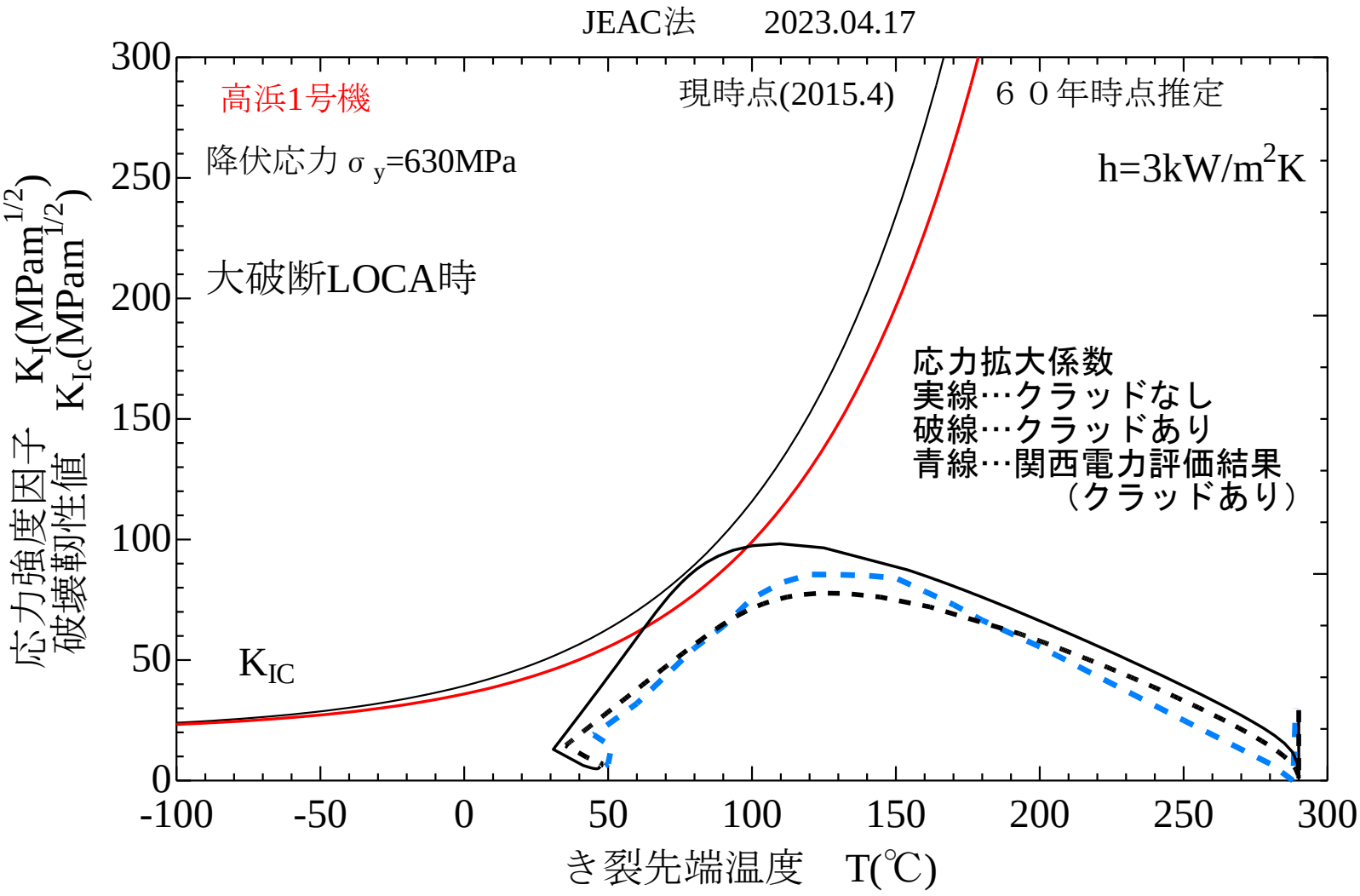
PTS評価（高浜1号機の場合）h=1kW/m^{2}K



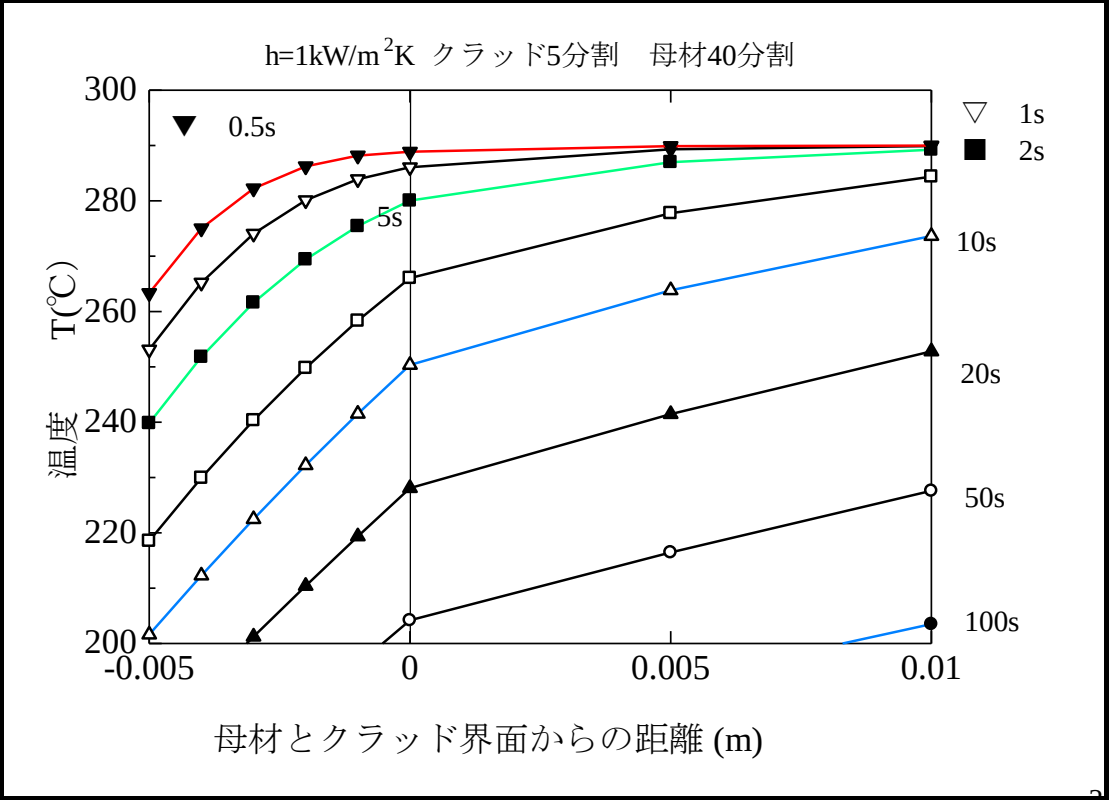
PTS評価（高浜1号機の場合）h=2kW/m²K



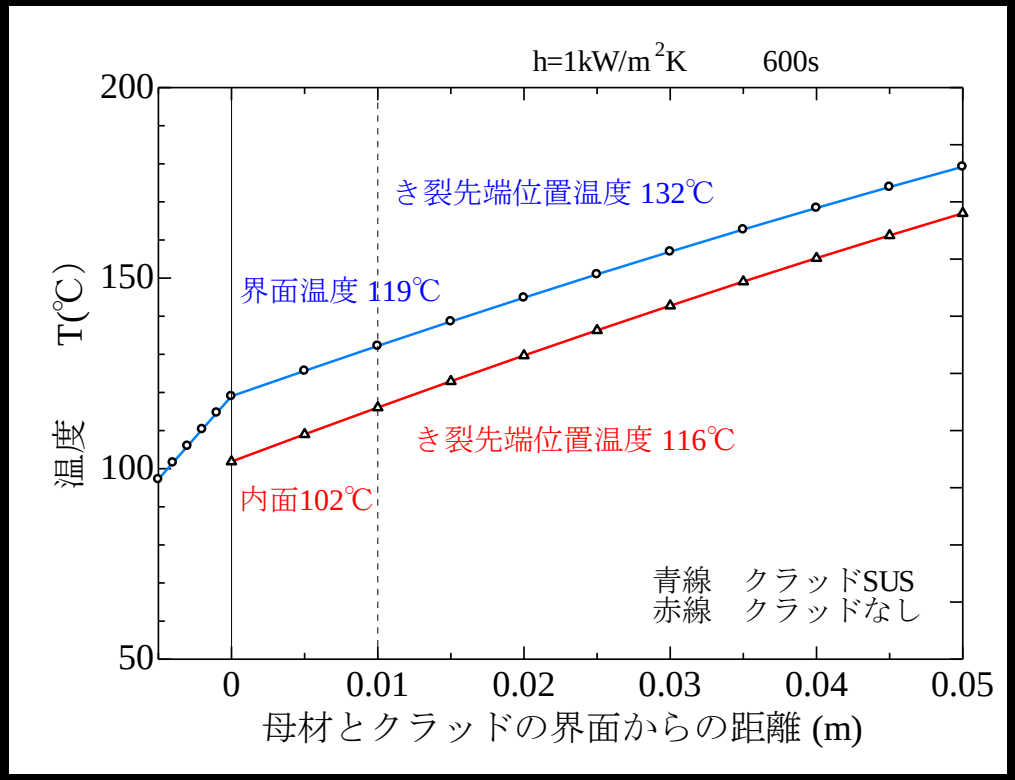
参考　3kW/m²K


JEAC法　2023.04.17
高浜1号機
降伏応力 σ y=630MPa
大破断LOCA時
現時点(2015.4)
６０年時点推定
h=3kW/m2K
応力拡大係数
実線…クラッドなし
破線…クラッドあり
青線…関西電力評価結果
（クラッドあり）
KIC
応力強度因子　KI(MPam1/2)
破壊靭性値　KIc(MPam1/2)
き裂先端温度　T(℃)
300
250
200
150
100
50
0
-100
-50
0
50
100
150
200
250
300

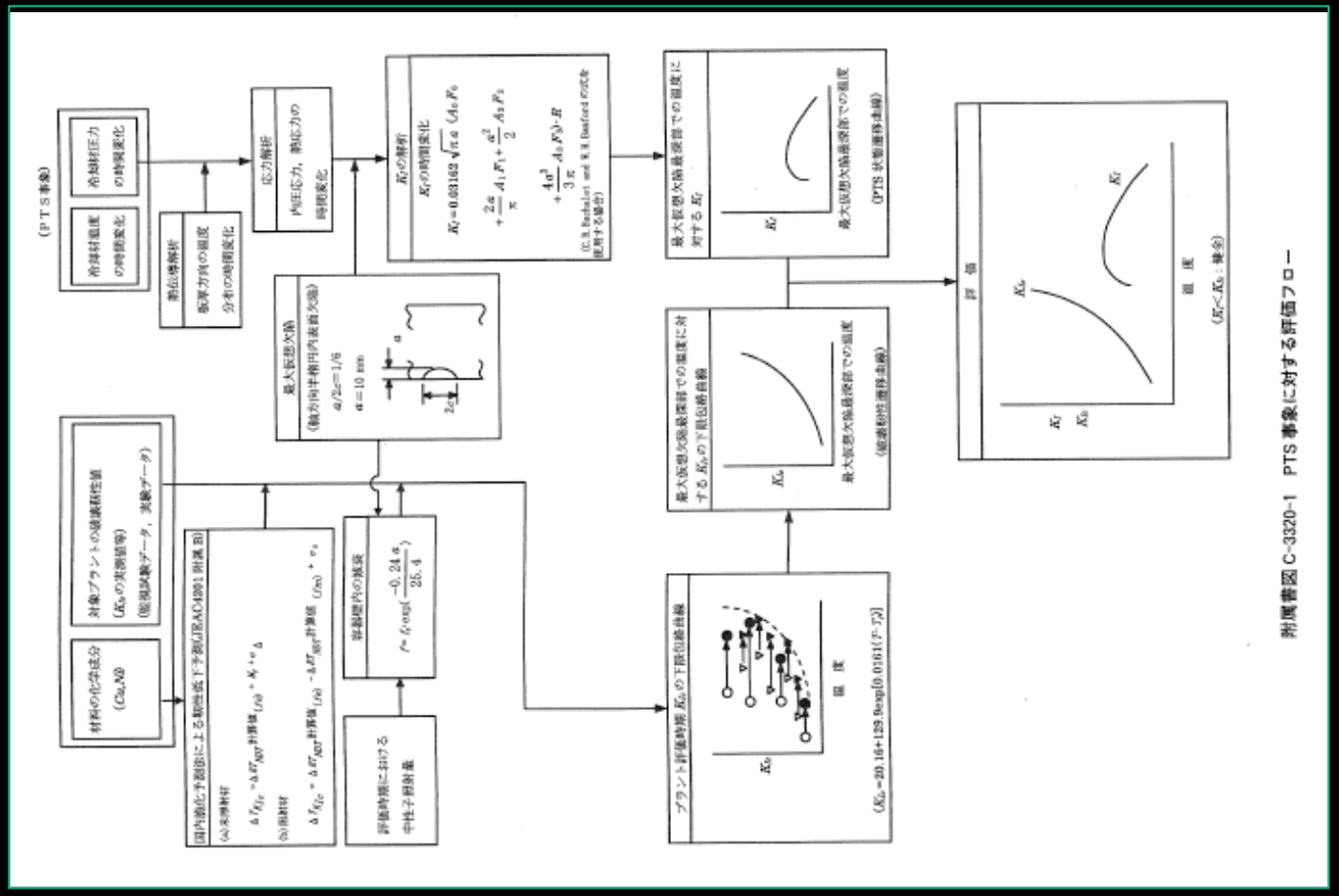
クラッドの温度分布(t=0～20sec)



圧力容器温度分布詳細（t=600sec）



PTS評価フロー(JEAC4206-2007)



附属書図 C-3320-1 PTS 事象に対する評価フロー

第2種完全楕円積分

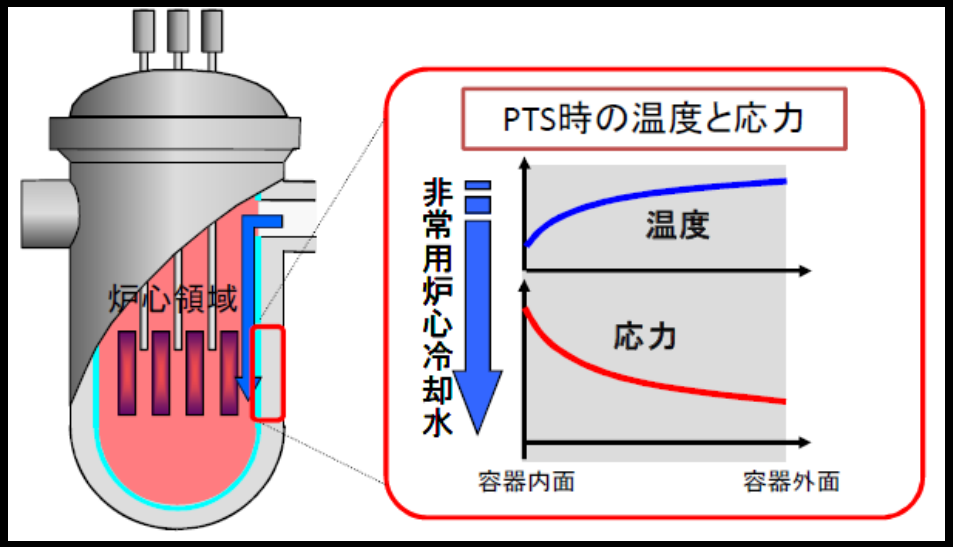
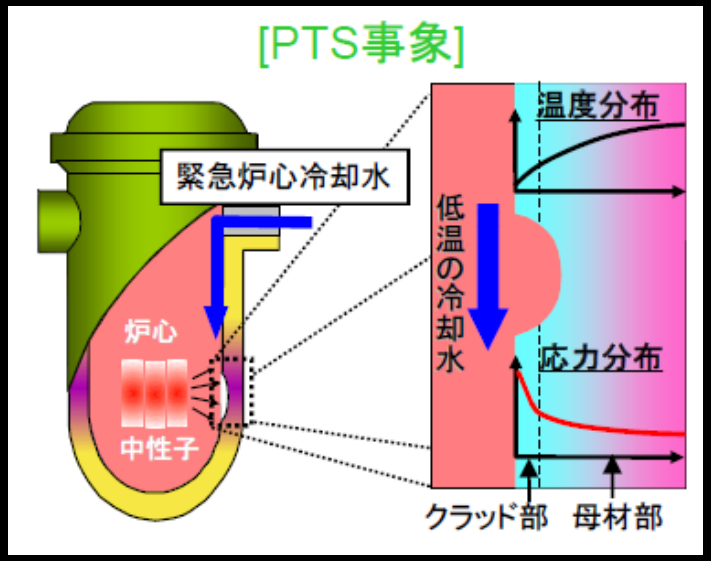
$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2\theta}\, d\theta = \int_0^1 \frac{\sqrt{1 - k^2 x^2}}{\sqrt{1 - x^2}}\, dx$$

ここで, $k^2=1-k'^2=1-(a/c)^2$

$E(k)=(2/\pi)Q=(2/\pi)\{1+1.464(a/c)^{1.65}\}$

円の場合　a=c ,k=0

$E(0)=(2/\pi)\{1+1.464\times 1\}=(2/\pi)\times 2.46=1.57$

$=\pi/2$　　⇒周長の1/4

解析モデル（クラッドの有無）