資料１－２
令和3年7月7日
第5回高度化検討分科会

供用適性評価基準*)（KHK/PAJ/JPCA S0851：2014）の高度化検討について

令和3年7月7日
供用適性評価規格委員会
高度化検討分科会　事務局

＊）高圧ガス設備の供用適性評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準

本資料の内容

1. 供用適性評価（FFS）と国内外の主な動き
2. 評価区分Ⅱの減肉評価　過去の検討経緯
3. 高度化検討分科会での検討（これまで）
4. 減肉を有する円筒のモデル実験と解析（内圧昇圧）の紹介
5. 評価区分Ⅱの減肉評価に関する事務局の考え

1．供用適性評価（FFS）とは

- 供用適性評価（FFS：Fitness For Service）とは、設備が供用中、十分な耐圧性能及び強度を維持できるか否かを評価することをいう。
- また、供用適性評価の実施時点からの設備の供用可能期間を設備の余寿命という。
- 供用適性評価を実施した結果、設備の余寿命に応じて、次回検査時期（厚さ測定及び開放検査等）を設定できる。

１．ＦＦＳに関する国際的な動き（米国）

- API（米国石油学会）によるAPI 579（Fitness For Service－2000年版）の発行

- 2007年 ： ASME（米国機械学会）とAPIとの共同によるAPI 579-1/ASME FFS-1の発行（最新版2016年）
  - 評価対象損傷

    減肉、孔食腐食、ブリスターおよび水素損傷、溶接部のミスアライメント、き裂状欠陥、クリープ評価、火災損傷 等々

１．ＦＦＳに関する国際的な動き（欧州）

- FITNET（European Fitness for service Network）プロジェクト（予算160万ユーロ）
  - 2002年より４年計画としてECからの資金支援も得て活動）（2006年5月終了）
  - 米国API/ASME FFS規格のデ・ファクト化を警戒
  - 合意された（究極的には欧州標準にすることのできる）欧州要領の作成
  - き裂、クリープ、疲労、減肉
  - 適用分野は圧力設備に限定していない。
- FITNET MK8:2008がBS7910の背景資料に

BS7910:2013 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures
（最新版２０１９年版）

1．FFSに関する国内の主な動き

- 石油連盟と石油化学工業協会共同によるFFS研究会の設立、及び供用適性評価ハンドブックの作成（2002）
- 日本機械学会(JSME)による発電用原子力設備規格維持規格(2000)、配管減肉評価規格(2007)の発行
- 日本高圧力技術協会（HPI）によるHPIS Z 101 圧力機器のき裂状欠陥評価方法の発行(2001)
（最新版：HPIS Z101-1(2008), Z101-2(2011)）
- 茨城県 高圧ガス施設設備維持基準「圧力機器の外面腐食に対する評価規格-2006年（2009年改訂）」発行(p-M法）
- KHK/PAJ/JPCA S0851供用適性評価基準の発行（2009）
（最新版2014年）(減肉、水素侵食、クリープ、き裂状欠陥）
- 石特委託調査「既設高圧ガス設備の耐震性評価基準の調査研究」の実施（2010～2013FY)
- 日本溶接協会WES2820圧力設備の供用適性評価-減肉評価 発行(2015)　※API579-1ベース

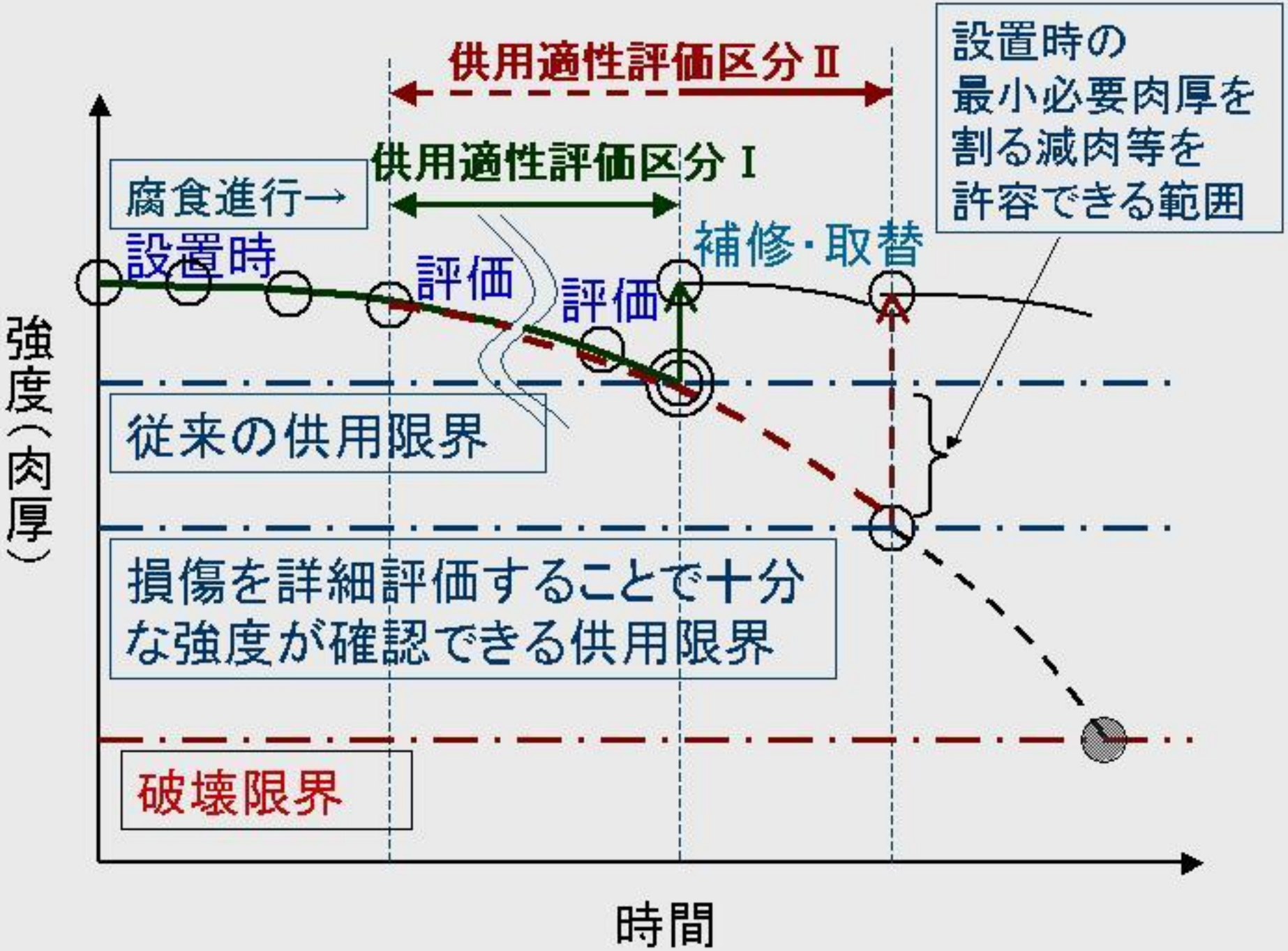
２. 評価区分Ⅱの減肉評価 過去の検討経緯

- KHK/PAJ/JPCA S0851初版（2009年）検討時に規格化を検討
- ２つの異なる評価法が提案

１）石連・石化協FFS研究会作成：米国規格「API579-1／ASME FFS-1(2007)規格」ベースの評価法

２）茨城県「圧力機器の外面腐食に対する評価規格」（ｐ－Ｍ法）ベースの評価法

技術的背景・根拠等の精査、国際整合化などを考慮し、両論併記形の規格（附属書A：ｐ－Ｍ法、附属書B：API法）として提案


供用適性評価区分Ⅱ
設置時の
最小必要肉厚を
割る減肉等を
許容できる範囲
供用適性評価区分Ⅰ
腐食進行→
設置時
評価
評価
補修・取替
強度（肉厚）
従来の供用限界
損傷を詳細評価することで十分
な強度が確認できる供用限界
破壊限界
時間

2. 評価区分Ⅱの減肉評価 過去の検討経緯

- 米国規格「API579-1／ASME FFS-1（2007）」の減肉評価は は破裂試験データに基づく経験式ベースの評価法（附属書5B案は局部減肉評価レベル2をベース）
- 茨城県「圧力機器の外面腐食に対する評 価規格案」（p－M法）は論理式より評価式・グラフを導出、実験・解析等により検証した評価法（附属書5A案は内面減肉にも適用範囲を拡大したもの)

↓

- 許容される傷の大きさに相違
- FEM解析等で検証し、特に降伏強さが低下する高温時に、APIベースの方法で許容される傷の一部に、減肉部近傍が全断面降伏する場合が含まれる

→ 議論が纏まらず、石油・石化業界からの時期尚早との提案により、この部分の規格化は見送り。

３．高度化検討分科会での検討（これまで）

- 第２０回供用適性評価規格委員会（平成29年8月10日開催）において、高度化検討分科会を設置することを決定した。
- タスク：
  供用適性評価基準の見直し及び高度化を具体的に検討し、検討成果を取り纏めて供用適性評価基準の改正案を作成し、供用適性評価規格委員会へ上申すること
- 開催：第１回（H30.3.8）　第２回（H30.7.27）
  第３回（R2.7.10）　第４回（R2.8.26)

※別途「ASME PVP2020-21085及び21086論文検討会」を開催（R2.9.29)

３．高度化検討分科会での検討

- 規格を所掌する供用適性評価規格委員会及び高度化検討分科会において検討中の課題は以下の４つ
  ① 評価区分Ⅱの減肉評価法の取り入れ
  ② 溶接補修後の耐圧試験の要否等に関する規定の見直し・高度化
  ③ き裂状欠陥評価法第２段階評価（HPISZ101-2）の追加導入
  ④ 検査周期設定係数0.8を適用する際の条件設定の見直し要否検討

3. 高度化検討分科会での検討

- 「高度化検討の方向性について（案）」（第1回本分科会（H30.3.8）資料2）は出席委員全員の承認が得られた（第1回分科会議事録参照）。
- 高度化検討の方向性（第１回本分科会資料２）

①評価区分Ⅱの減肉評価法

供用適性評価基準附属書5としてp-M法を取り入れる

今回（第5回）分科会から再度議論

②溶接補修後の耐圧試験の要否等

【一般炭素鋼及びオーステナイト系ステンレス鋼の溶接補修】

平成22年度から平成25年度METI委託事業の評価基準案ベース

【高張力鋼その他の材料についての溶接補修】

現行の保安検査基準に規定されている6点法の適用を拡張する方向性

③き裂状欠陥評価法第２段階評価（HPISZ101-2）

①と関連有

HPISZ101-2規格を取り入れる

④検査周期設定係数0.8を適用する際の条件設定

本分科会での議論を通じて検討

3. 高度化検討分科会での検討

減肉評価とき裂状欠陥評価の整合性

（本分科会第１回資料2の補足）

- ①評価区分Ⅱの減肉評価法とは:

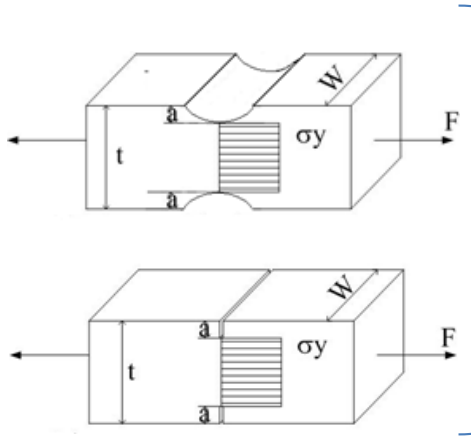
  残厚さが最小厚さ（設備の建設時の基準）未満となる減肉の供用適性評価（＝塑性崩壊評価）

- ③き裂状欠陥評価法第2段階評評価とは:

  き裂状欠陥の破壊評価線図（FAD）（縦軸が脆性破壊に関する評価（靭性比）、横軸が塑性崩壊に関する評価（荷重比））を用いた供用適性評価

①減肉

③き裂状欠陥



材料を弾完全塑性体とみなした場合の

塑性崩壊条件は減肉とき裂状欠陥において同じ

塑性崩壊条件

$$\sigma_{ref} = \sigma_y = \frac{F}{W(t-2a)}$$

σ_{ref} ：参照応力　σ_y ：材料の降伏強さ

①の評価と③の評価（横軸）は技術的背景の整合必要

3. 高度化検討分科会での検討
減肉評価とき裂状欠陥評価の整合性
（本分科会第1回資料2の補足）

- 日本

＜減肉評価＞

・*p-M*法（茨城県高圧ガス設備維持基準）

＜き裂状欠陥評価＞

・HPIS Z 101-1:2008圧力機器のき裂状欠陥評価方法-第1段階評価

・HPIS Z 101-2:2011圧力機器のき裂状欠陥評価方法-第2段階評価

KHK/PAJ/JPCA S0851(2014) 4.4項及び附属書11として採用済

整合

- 米国

＜減肉評価＞

・API579-1/ASME FFS-1 (2016) Fitness For Service Part5 Assessment of Local Metal Loss

＜き裂状欠陥評価＞

・API579-1/ASME FFS-1 (2016) Fitness For Service Part9 Assessment of Crack-Like Flaws

不整合

一貫していない
（平板と円筒で整合性がない、など）

日米の手法の比較検証*)からAPIの評価法は導出不明かつ過小評価となりえるため、①評価区分Ⅱの減肉評価法として*p-M*法を、③き裂状欠陥評価法第2段階評価としてHPIZ101-2:2011を、それぞれ採用する

今回（第5回）分科会から再度議論

*)Oyamada, et al., IJPVP, 88, pp. 507-517, 2011.

3. 高度化検討分科会での検討

- 前回分科会までの検討での改正案作成状況

（※高度化検討の方向性④についてはペンディング）

① 評価区分Ⅱの減肉評価法の取り入れ

圧力による内圧と外力（地震など）による曲げモーメントが作用する条件下での：

a. 円筒の外面又は内面の単独の減肉 →**作成済**（第3回分科会で提示済）
b. 同複数の減肉 → 第3回分科会で提示済
c. 曲げ管（エルボ）の減肉 → 同上
d. ノズル近傍の減肉 → 同上

急ぎ規格化を行う場合には評価対象をAPI579-1と合わせa.に限定すれば作成済

② 溶接補修後の耐圧試験の要否等に関する規定の見直し・高度化

→ **作成済**（第3回分科会で提示済）

③ き裂状欠陥評価法第2段階評価（HPISZ101-2）の追加導入

1次応力及び2次応力が作用する条件下での：

a. 円筒の外面、内面又は内部の単独のき裂状欠陥
b. 同複数のき裂状欠陥
c. 球殻の外面、内面又は内部の単独のき裂状欠陥
d. 同複数のき裂状欠陥

作成済（第3回分科会で提示済）

４. 減肉を有する円筒のモデル実験と解析（内圧昇圧）の紹介

ここでは、過去に実施したモデル実験や解析の例と、減肉を有する円筒が内圧を昇圧した際の破壊挙動について紹介する。

紹介事例:

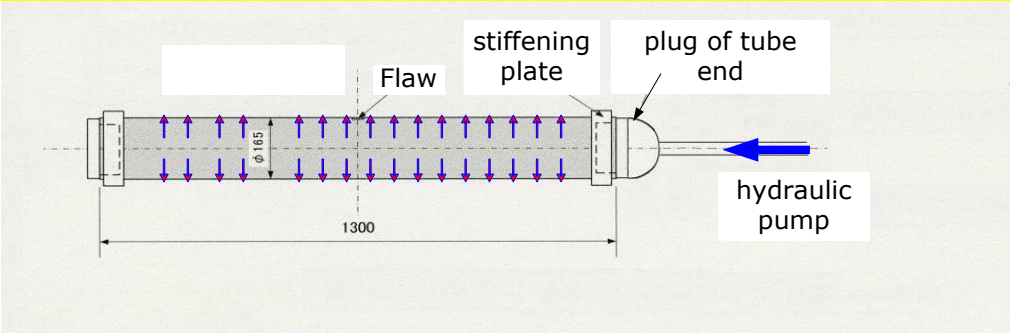
・外面減肉を付した直管の実験*1

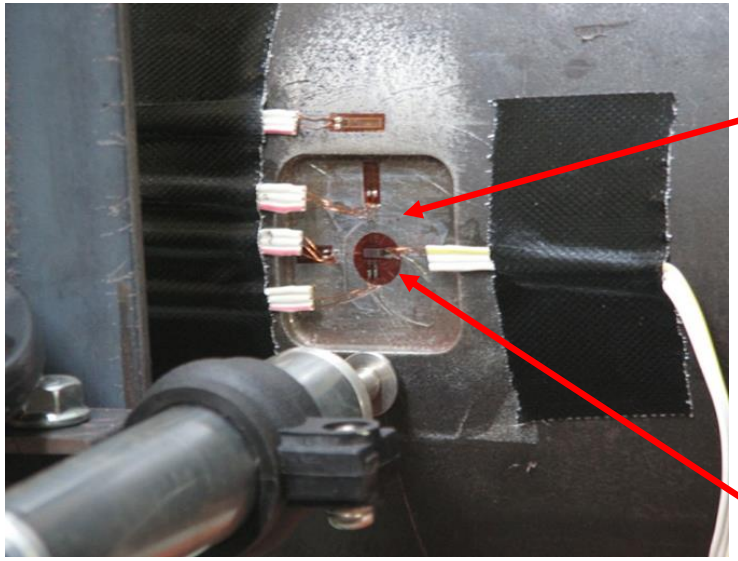
・内面減肉を付した直管のFEM(有限要素法)解析*2

*1　茨城県：2005 年、2006 年の電源立地地域対策交付金事業（経済産業省）実証試験
*2　KHK ： H22年度経済産業省委託 既設高圧ガス設備の耐震性評価に関する調査

外面減肉を付した直管の実験（内圧昇圧）

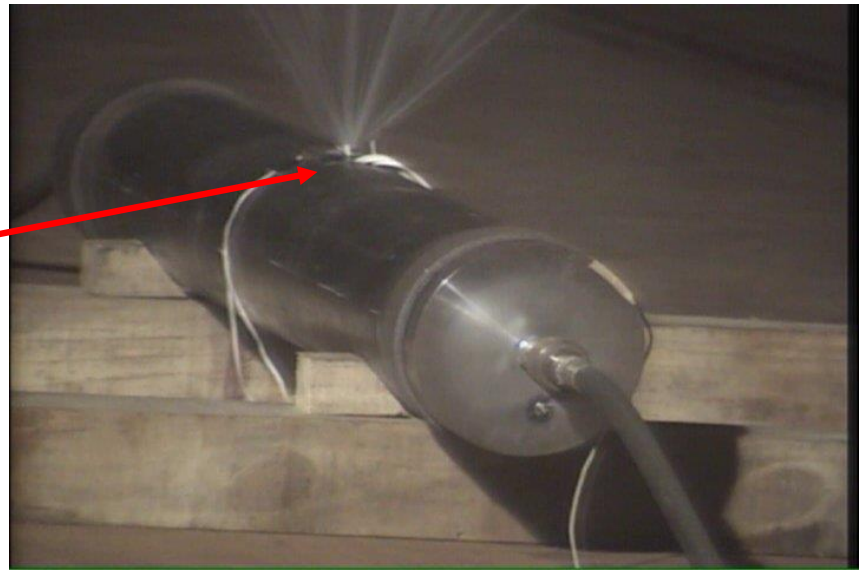
減肉部の塑性崩壊（全断面降伏）挙動を把握するため、外径165.5mm、厚さ5.5mmの炭素鋼鋼管の内面に30×30mm四方の2.83mm深さの減肉欠陥を付し、内圧を加圧する実験及びFEM解析を実施。





ひずみゲージ貼付の様子

減肉欠陥



減肉欠陥から破裂リーク時の様子

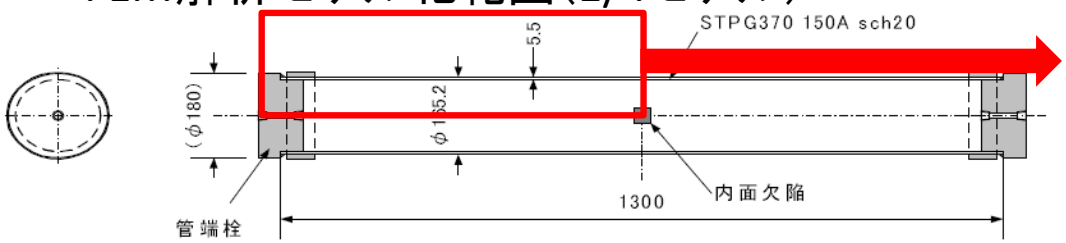
ひずみゲージ：
減肉欠陥での弾性変形および
塑性変形挙動を捉える

茨城県：2005 年、2006 年の電源立地地域対策交付金事業（経済産業省）実証試験

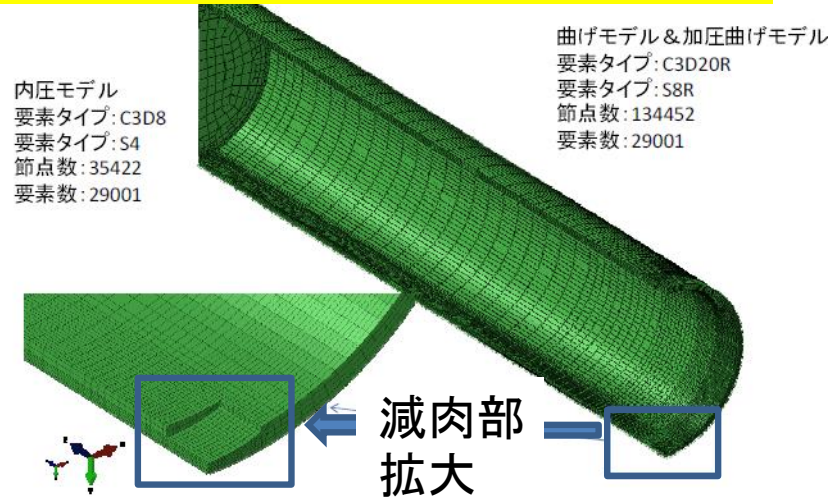
内面減肉を付した直管のFEM解析（内圧昇圧）

減肉部の塑性崩壊（全断面降伏）挙動を把握するため、外径165.2mm、厚さ5.5mmの炭素鋼鋼管の内面に30×30mm四方の2.75mm深さの減肉欠陥を付し、内圧を加圧する実験及びFEM解析を実施。

FEM解析モデル化範囲（1/4モデル）

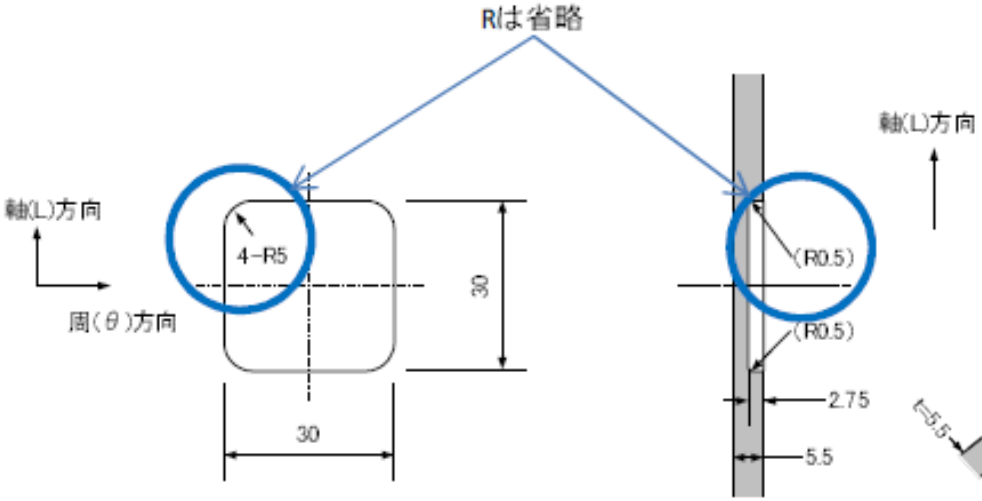


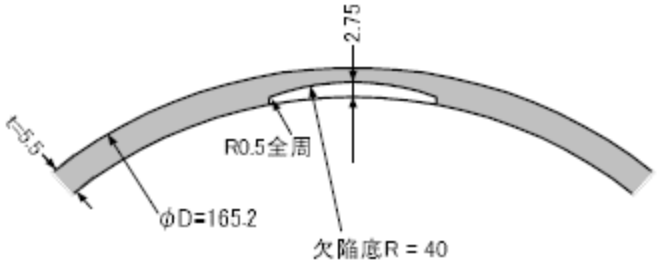
内面欠陥を付した円筒実験モデル



内面欠陥を付した円筒
FEM解析モデル（1/4モデル）

※ここでは内圧負荷したときのFEM解析結果（動画）をご覧いただきます。





内面欠陥部拡大

H22年度METI委託「既設高圧ガス設備の耐震性評価に関する調査」より

内面減肉を付した直管のFEM解析（内圧昇圧）

減肉部が全断面降伏した後、
健全部が全断面降伏した後に
減肉欠陥部が破裂する。

※色が付いたところが
降伏していることを示
します。

①減肉部内面降伏

↓

②減肉部全断面降伏
p-M法の限界基準

↓

③健全部内面降伏

↓

④健全部全断面降伏

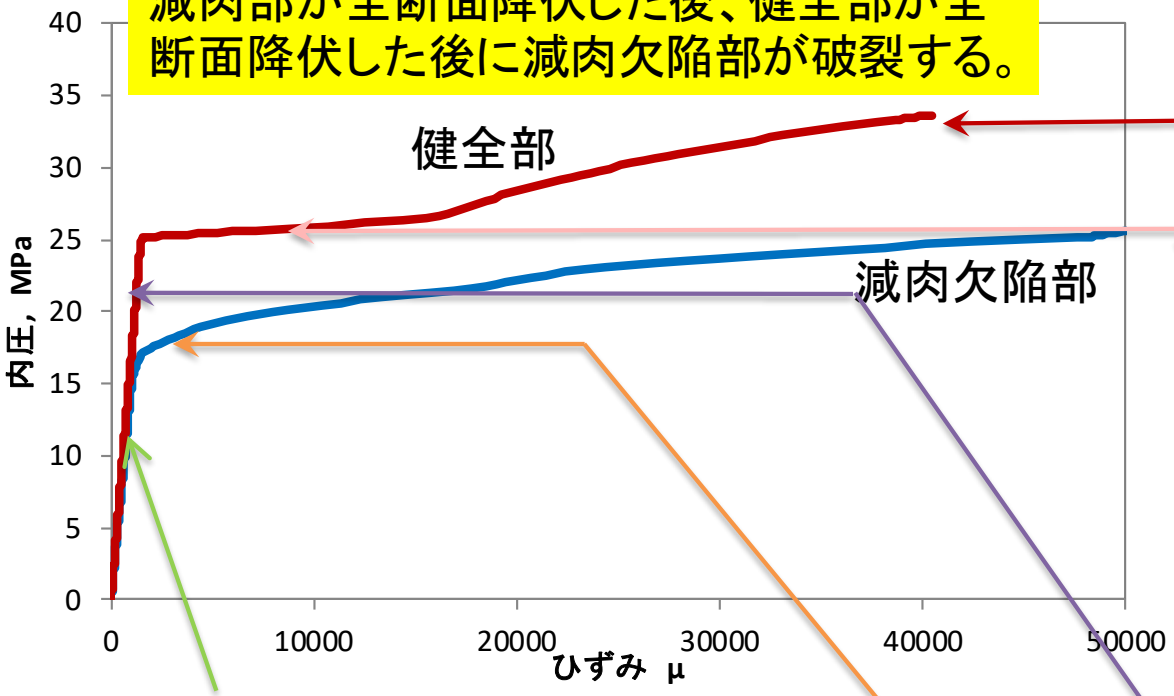
↓

⑤破裂（収束限界）
API法の限界基準

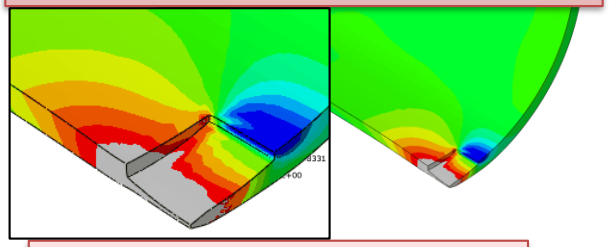
減肉部（1/4モデル）

内面減肉を付した直管のFEM解析（内圧昇圧）

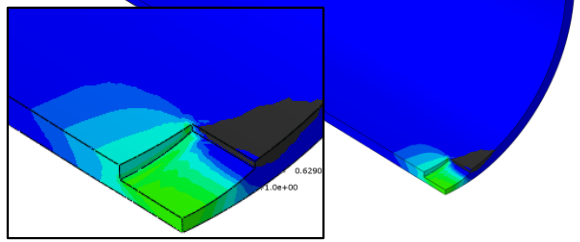
減肉部が全断面降伏した後、健全部が全断面降伏した後に減肉欠陥部が破裂する。



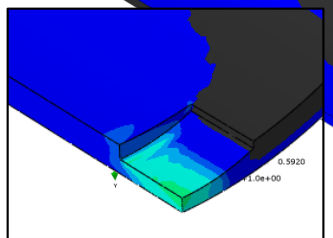
⑤収束限界 破裂
API法の限界基準
内圧33.2MPa



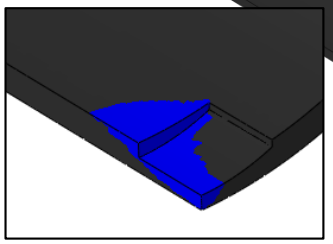
④健全部全断面降伏
内圧25.2MPa



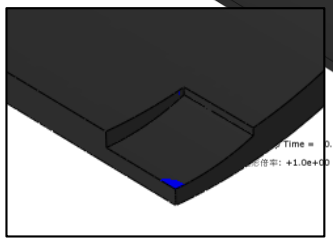
③健全部内面降伏開始
内圧21.2MPa



②減肉部全断面降伏
p-M法の限界基準
内圧17.1MPa



①減肉部内面降伏開始
内圧11.7MPa



５．評価区分Ⅱの減肉評価に関する事務局の考え

（１）減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価のためのFFS基準が具備すべき事項

（２）ｐ－Ｍ法とAPI法の参照応力解の比較検証

（３）FFS基準が具備すべき事項に関するｐ－Ｍ法及びAPI法の比較

（４）事務局の考え：まとめ

5. 評価区分Ⅱの減肉評価に関する事務局の考え

減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価のためのFFS基準が具備すべき事項

① 判断基準となる応力 － 参照応力 － の妥当性

減肉等を有する設備が、その減肉等を有したまま運転しても、例えば地震が来ても大丈夫かなども含め判断するための、力学的な計算式が妥当なものであること（＝力学の基本である力のつり合い条件を満たすこと。）

② 判定基準に材料の降伏強さの温度依存性が考慮されていること

金属材料は、例えば温度が350℃まで上昇すると、常温（40℃）よりも変形し易くなってくるので、判定基準に温度の影響が適切に考慮されていること

③ 減肉やき裂状欠陥の安全性の限界を塑性崩壊限界（全断面降伏）とすること

評価法が圧力容器の設計規格の安全性の限界と矛盾したものでないこと

API法は、参照応力解が力のつり合い条件を満たしていない他、塑性崩壊評価のための基準が具備すべき事項を満足していない。以下で説明。

p-M法とAPI法の参照応力解の比較

・平板に表面半楕円欠陥のあるときの参照応力解：

Willoughbyらの提案（p-M法、API法：同じ）

$$\sigma_{\mathrm{ref}} = \frac{g\sigma_{\mathrm{b}} + \sqrt{(g\sigma_{\mathrm{b}})^2 + 9\sigma_{\mathrm{m}}{}^2(1\text{-}\alpha)^2}}{3(1\text{-}\alpha)^2}$$

σ_b は小さいので σ_b □ 0 とすれば

$$\sigma_{\mathrm{ref_平板}} = \frac{\sigma_{\mathrm{m}}}{(1\text{-}\alpha)}$$

p-M法とAPI法の最大の違い

・円筒軸方向に表面半楕円欠陥のあるときの参照応力解

p-M法：

2乗

$$\sigma_{\mathrm{ref_p\text{-}M}} = \frac{g\sigma_{\mathrm{b}} + \sqrt{(g\sigma_{\mathrm{b}})^2 + 9(M_{\mathrm{s}}\sigma_{\mathrm{m}})^2(1-\alpha)^2}}{3(1-\alpha)^2}$$

σ_b □ 0とすれば

$$\sigma_{\mathrm{ref_p\text{-}M}} = \frac{M_S\sigma_{\mathrm{m}}}{(1\text{-}\alpha)}$$

HPIS Z101-2のき裂状欠陥評価も同じ式

平板の式と整合

API法：

4乗

$$\sigma_{\mathrm{ref_APIき裂}} = \frac{g\sigma_{\mathrm{b}} + \sqrt{(g\sigma_{\mathrm{b}})^2 + 9(M_{\mathrm{s}}\sigma_{\mathrm{m}})^2(1-\alpha)^4}}{3(1-\alpha)^2}$$

σ_b □ 0 とすれば

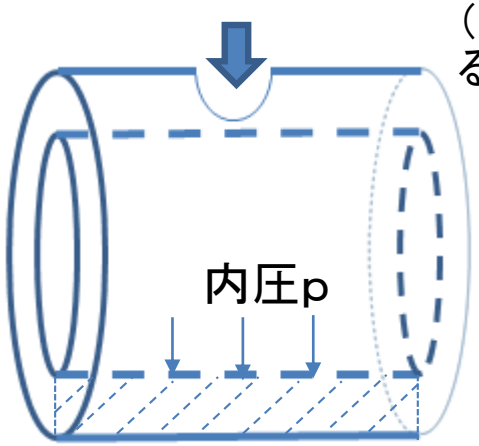
$$\sigma_{\mathrm{ref_API}} = M_S\sigma_{\mathrm{m}}$$

減肉評価でも $\sigma_{\mathrm{ref_API減肉}} = M_S\sigma_m$ と同じ式

平板の式と不整合

分母に(1-α)があるかどうか

p－M法とAPI法の比較　内半径Riの関係

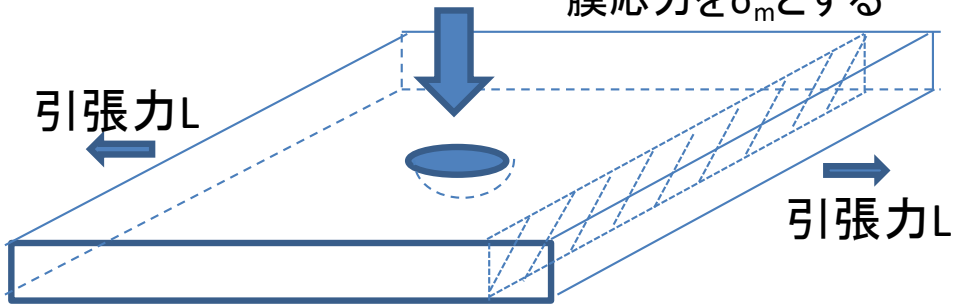


内圧pにより健全部（ハッチング）に生じる膜応力をσ_mとする

減肉部を有する**円筒**

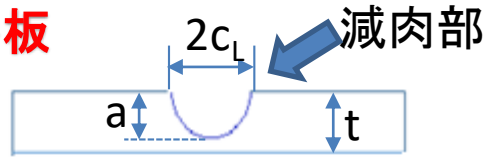
Ri → ∞

半径増加



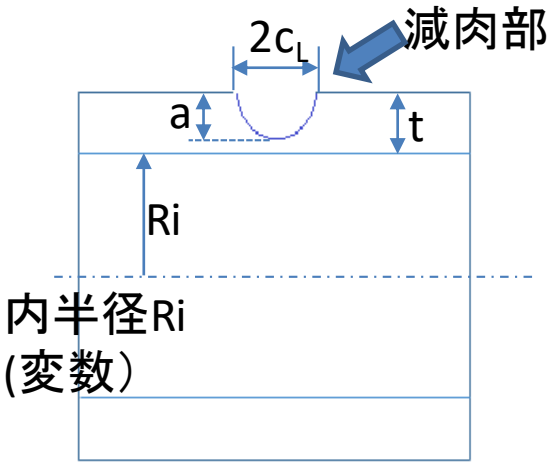
引張力Lにより健全部（ハッチング）に生じる膜応力をσ_mとする

減肉部を有する**平板**



減肉部の中心（最深部）を含む平板の断面
（減肉の大きさは円筒と同じ）

※減肉から離れた健全部の応力をσ_mとする。
（円筒と平板で一定）
※曲げ応力は無視する。



減肉部の中心（最深部）を含む円筒の断面

円筒の参照応力解　　平板の参照応力解との整合性

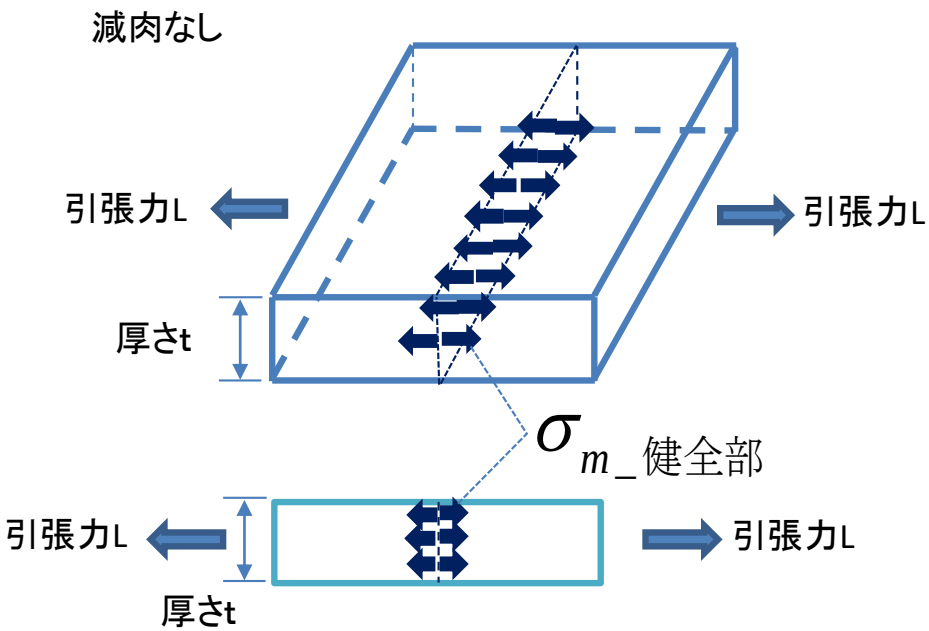
p-M法　$\sigma_{ref_p\text{-}M} = \dfrac{M_S \sigma_m}{(1\text{-}\alpha)}$ ⇒ $\sigma^{p\text{-}M}_{Ref_Ri=\infty} = \dfrac{\sigma_m}{(1\text{-}\alpha)}$　OK

半径増加

API法　$\sigma_{ref_API} = M_S \sigma_m$ ⇒ $\sigma^{API}_{Ref_Ri=\infty} = \sigma_m$　NG

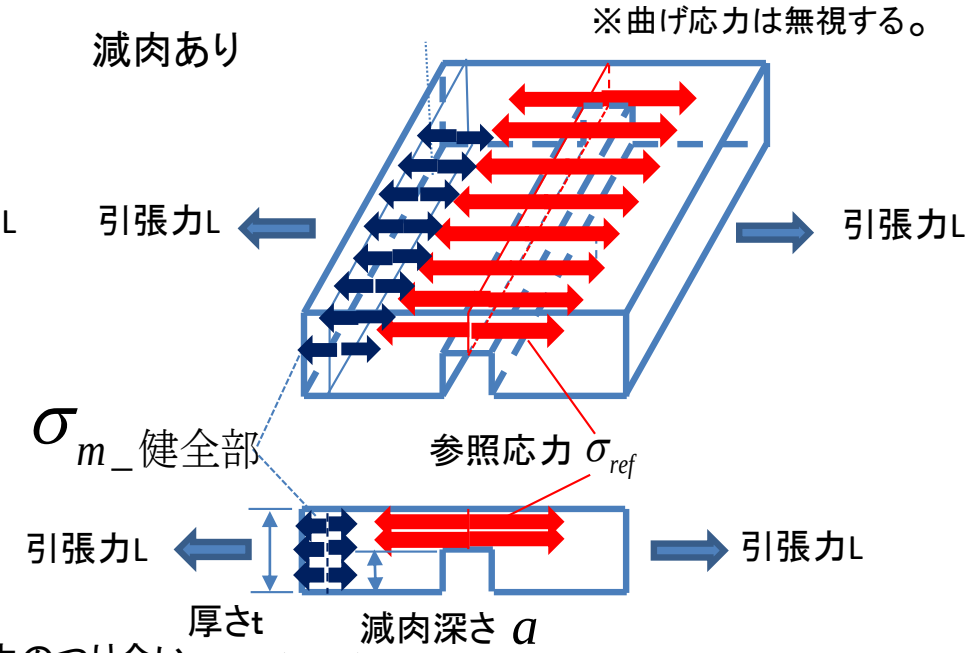
APIの問題点　API法の円筒の参照応力解は平板の参照応力解と整合性がな

解説：参照応力解における(1-α)の意味
＝減肉の存在による断面積の減少の考慮



力のつり合い

$$L = t\sigma_{m_健全部}$$



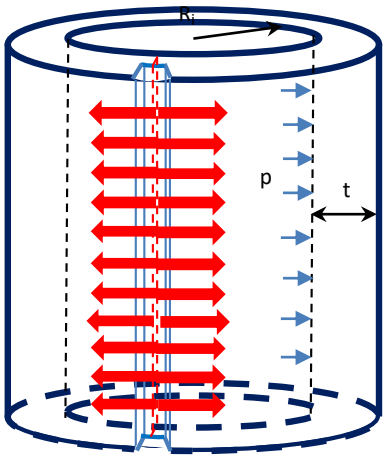
力のつり合い $L = (t-a)\sigma_{ref} = t\sigma_{m_健全部}$

よって参照応力σ_{ref}は

$$\sigma_{ref} = \frac{t}{t-a}\sigma_{m_健全部} = \frac{1}{1-\frac{a}{t}}\sigma_{m_健全部}$$

減肉のない場合と比較すると、減肉のある場合には、減肉部の厚さの減少、すなわち**断面積の減少に反比例して参照応力は増加する。**

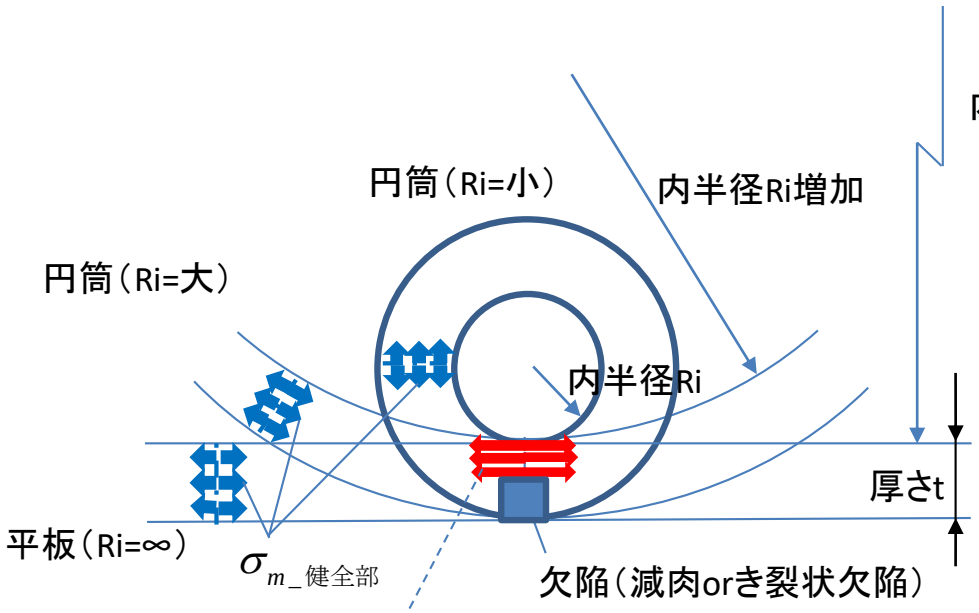
解説:円筒と平板の参照応力解の関係



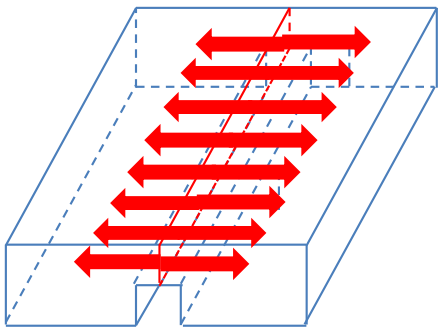
参照応力解 σ

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1-\frac{a}{t}}$$

ここでは**バルジング効果(後述)**は無視する(Ms＝1)



参照応力σ_{ref}



参照応力解

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1-\frac{a}{t}}$$

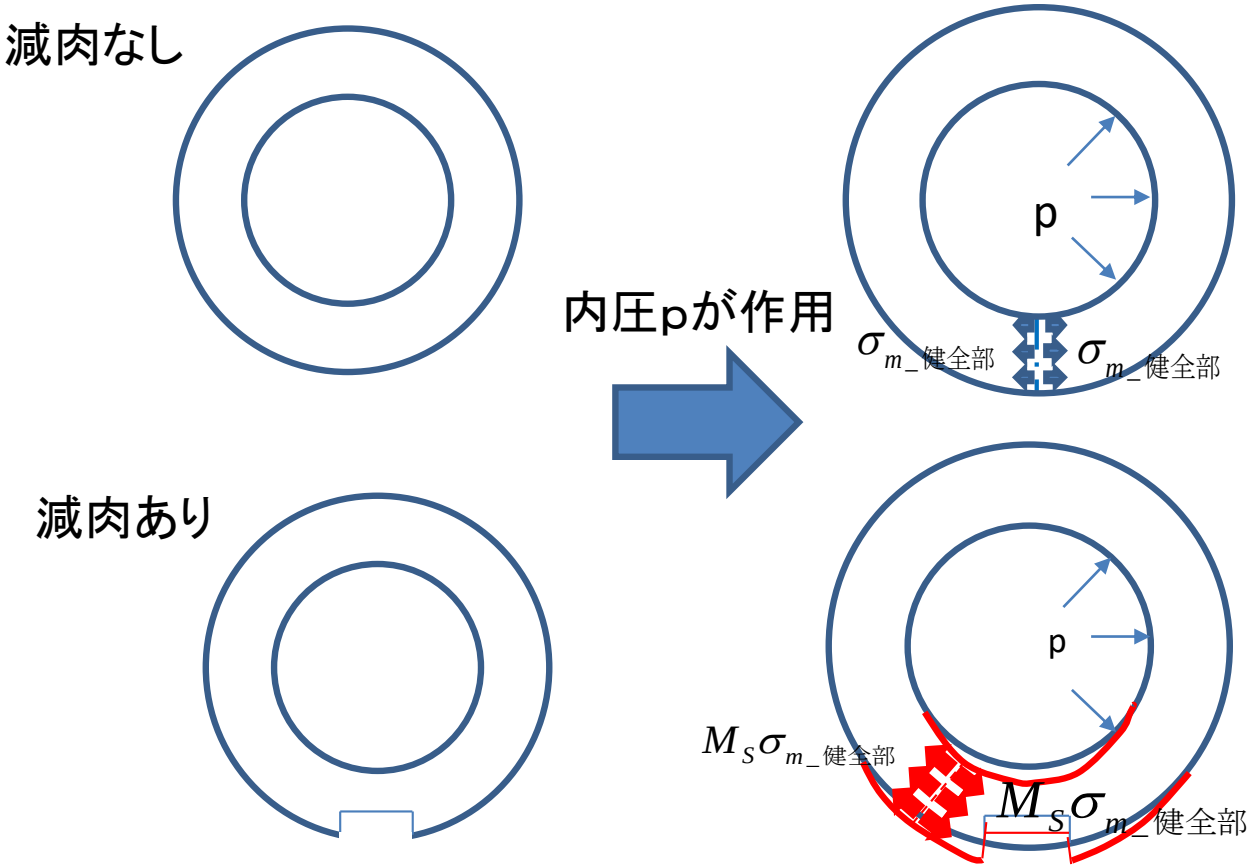
円筒の内半径Riを増加していくと、Ri＝∞(無限大)となった場合が平板になる。

すなわち、円筒の参照応力解も平板の参照応力解に一致する。

なお、き裂状欠陥評価の規格においては、Ri/t>5の円筒であれば平板として平板の応力拡大係数を用いることができるとしている(e.g. HPISZ101-1 3.1.1、API579-1/ASME FFS-1 9.2.2.1e)1)ii))。

解説：参照応力解におけるMsの意味
＝減肉の存在による円筒の膨れ（バルジング効果）

※曲げ応力は無視する。



$$\sigma_{m_健全部} = \frac{p \times 2R_i}{2t} = \frac{pR_i}{t}$$

減肉のない円筒では膜応力$\sigma_{m_健全部}$は円筒に一様に作用する。

円筒は減肉がある場合には、減肉がない場合に比べて余計に膨れる(赤い線)。これをバルジング効果という。バルジング効果によって、減肉のない円筒の健全部に作用する膜応力はMs倍されると定義する。

なお、バルジング効果は円筒の曲率がキツイほど、すなわち内半径が小さいほど大きい。

バルジングファクターとして、板厚を貫通しない欠陥に対してはMs、貫通する欠陥に対してはMtを用いる。Mt および Ms については、**API579-1/ASME FFS-1においてもバルジングファクター**とされている。(e.g. API579-1/ASME FFS-1 9C.2.3.1)

$$\sigma_{m_健全部} \rightarrow M_s\sigma_{m_健全部}$$

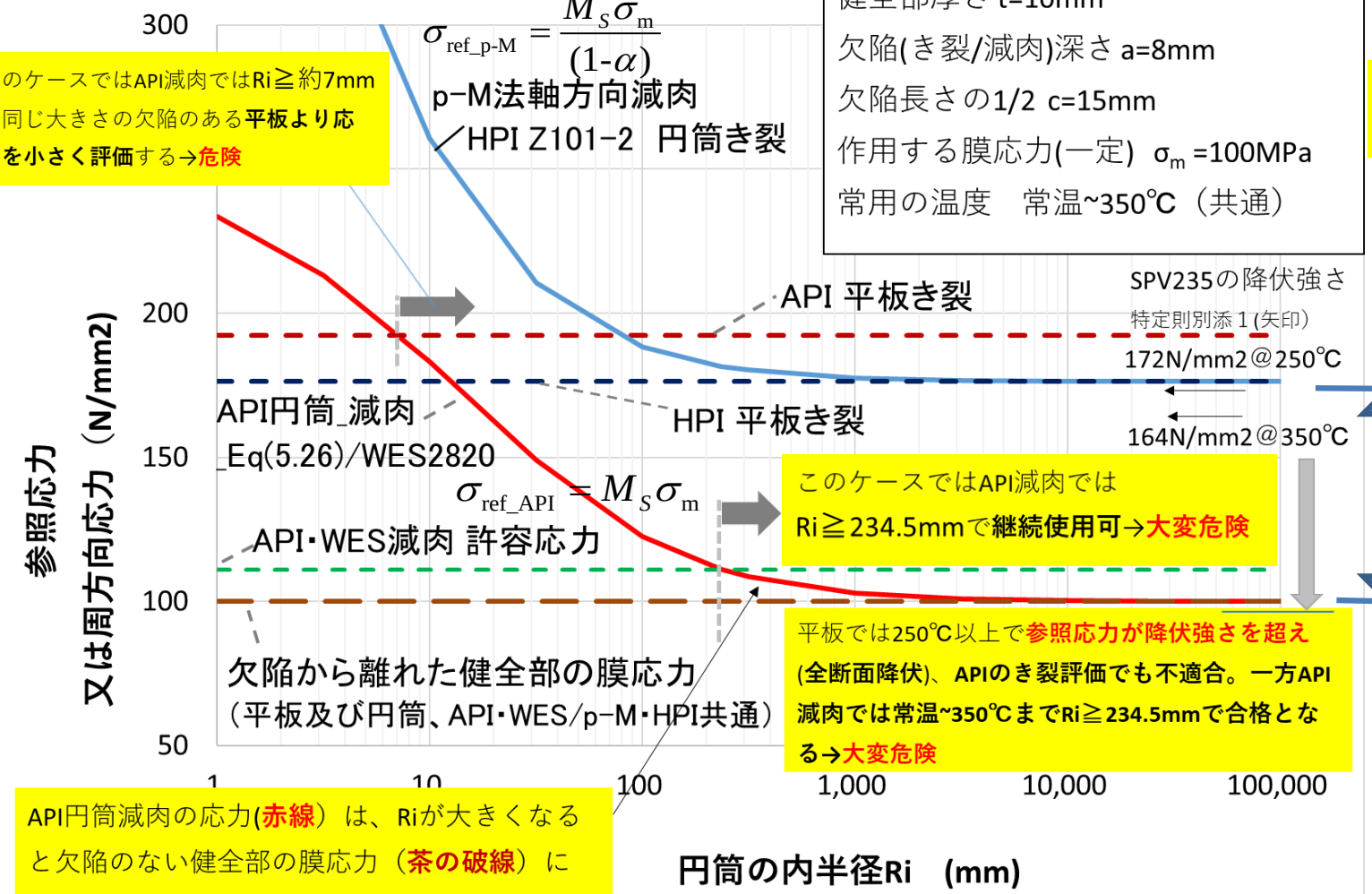
この**Msをバルジングファクター**という。

p－M法とAPI法の比較
API法の減肉/き裂状欠陥評価における参照応力解の本質的な問題

※曲げ応力は無視する

材料SPV235
健全部厚さ t=10mm
欠陥(き裂/減肉)深さ a=8mm
欠陥長さの1/2 c=15mm
作用する膜応力(一定) σ_m =100MPa
常用の温度　常温~350℃（共通）

APIの問題点を黄色で示す



このケースではAPI減肉ではRi≧約7mmで同じ大きさの欠陥のある**平板より応力を小さく評価**する→**危険**

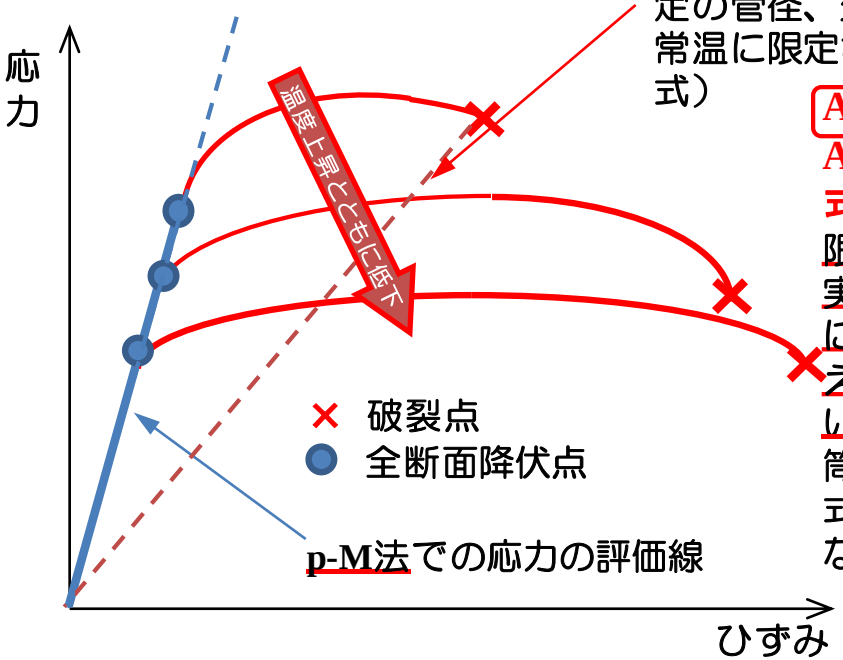
このケースではAPI減肉では
Ri≧234.5mmで**継続使用可**→**大変危険**

平板では250℃以上で**参照応力が降伏強さを超え(全断面降伏)、APIのき裂評価でも不適合。一方API減肉では常温~350℃までRi≧234.5mmで合格となる→大変危険**

API円筒減肉の応力(**赤線**）は、Riが大きくなると欠陥のない健全部の膜応力（**茶の破線**）に漸近する→**欠陥がないことになり大変危険**

この差が**p-M法とAPI法の参照応力解に1/(1-α)があるかどうかの差**である。物理的には欠陥による断面積の減少分の効果を示す。

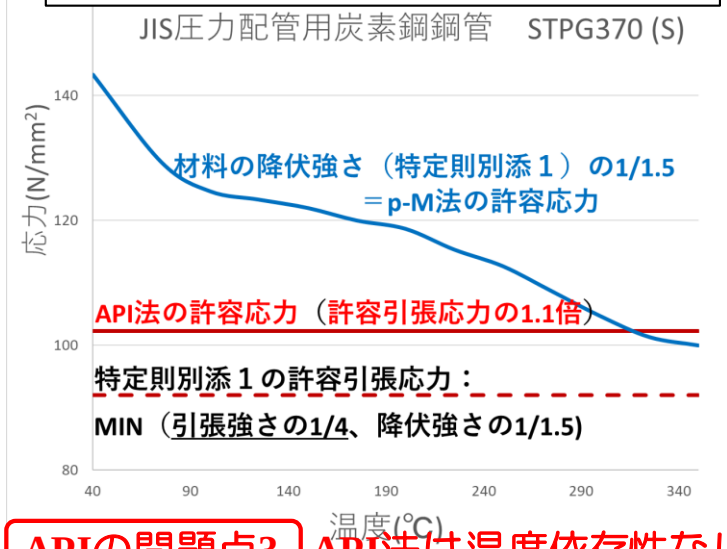
p-M法とAPI法の比較
参照応力解の基準点の違いとAPI法が応力を過小評価する理由、及び許容基準の温度依存性について



API法での応力の評価線（ラインパイプ材、特定の管径、欠陥寸法、常温に限定された実験式）

APIの問題1
API法は実験式：
限られた条件の実験式を広範囲に成り立つと考えるのは間違い。例えば、円筒の式が平板の式と整合していない。

許容応力σ_aと降伏強度σ_{ys}の温度依存性



APIの問題点3　**API法は温度依存性なし**

API法では許容基準に降伏強さの温度依存性が考慮されておらず、設計規格の塑性崩壊限界も満足しない。

- 上の炭素鋼の例では、許容応力σ_aに温度依存性がない。規定降伏強さσ_{ys}は温度依存性がある。
- 上図において$\sigma_a < \sigma_{ys}/1.5$で$\sigma_a$の方が小さく、安全側の評価をしていると考えがちだが、左図のAPI法での応力評価線を使用するため、減肉部に発生する応力を過小評価する影響が大きく、危険な評価となる。

APIの問題点2　**API法は応力を過小評価**

p-M法での応力の評価線は青線（ほぼ弾性変形）で行うが、API法では赤い破線で行っているので、内圧（ひずみ）が小さい常用圧力など実使用領域において、発生する応力を過小評価する。この応力は地震などの外力に対する評価にも用いるため、過小評価することは許容できない。

p−M法とAPI法の比較
設計規格（欠陥なし）における塑性崩壊条件と欠陥ありの場合の条件

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{ys}} = \frac{3}{2}\left\{\left(1-\frac{a}{t}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{ys}}\right)^2\right\}$$ **（p-M法）**

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_{ys}} = \frac{3}{2}\left\{1-\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{ys}}\right)^2\right\}$$ （構造規格）

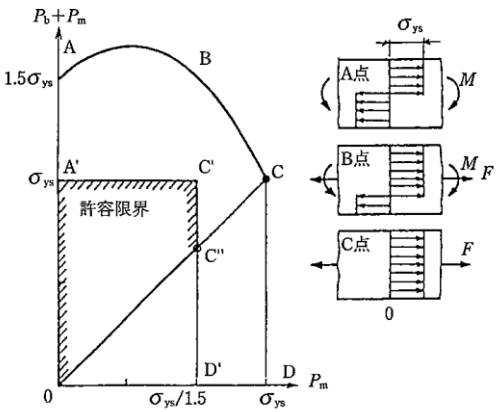
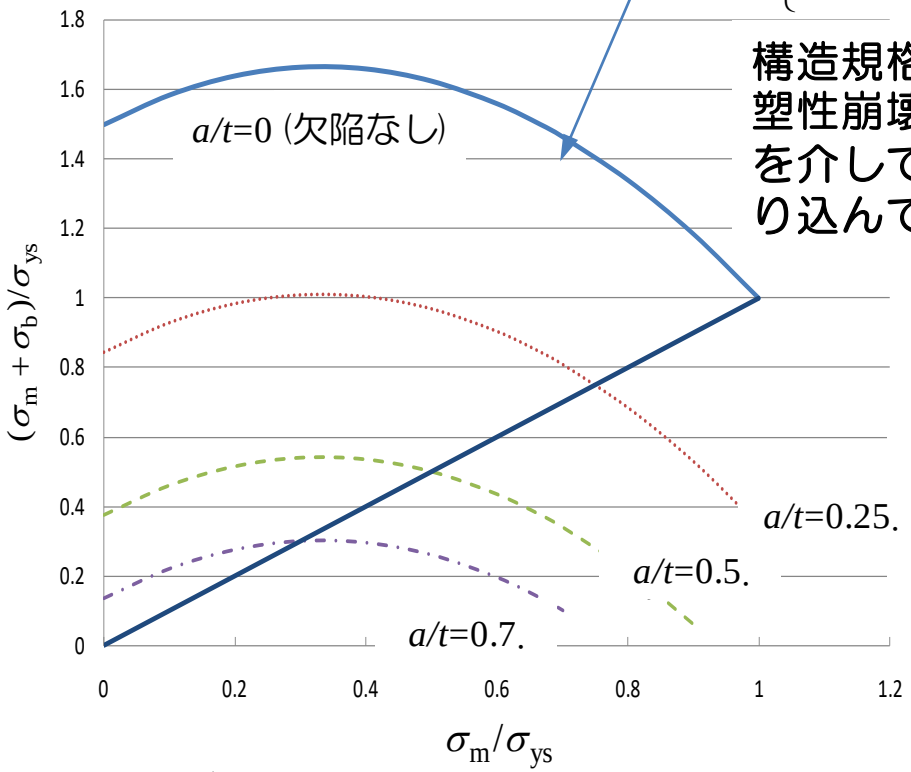


図8.8　塑性崩壊と許容限界



構造規格（欠陥なし）における塑性崩壊条件（規定降伏強度σ_{ys}を介して材質、温度の影響を取り込んでいる）

p-M法で欠陥寸法*a*の影響を取り込むことができる

（*a*=0とおけば、p-M法の式と構造規格の式は完全に一致する）

欠陥深さ*a*が大きい

許容される塑性崩壊限界は狭くなる

高圧ガス保安技術（甲種機械・化学テキスト）にも同じ図の説明があり、許容限界は

$$\sigma_m \le \sigma_{ys}/1.5、\quad \sigma_m + \sigma_b \le \sigma_{ys}$$

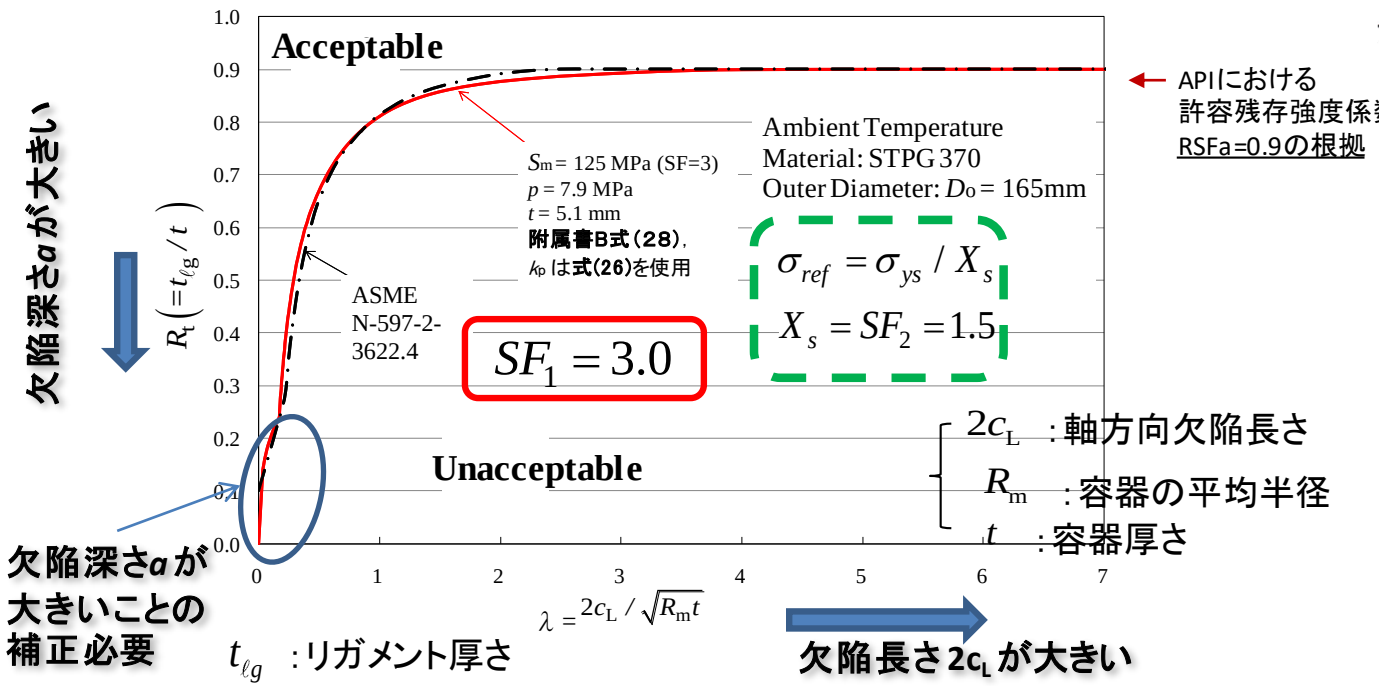
とされている。

p-M法/HPIS Z101-2と同じ。API/WESは異なる。

ASME Sec. XI Code Case N-597-2（-3622.4 Unlimited Transverse Extent）における塑性崩壊限界とp-M法との比較

$$\sigma_{\mathrm{ref}} = \frac{g\sigma_{\mathrm{b}} + \sqrt{\left(g\sigma_{\mathrm{b}}\right)^2 + 9\left\{M_{\mathrm{s}}\sigma_{\mathrm{m}}\left(1-\alpha\right)\right\}^2}}{3\left(1-\alpha\right)^2} \cong \frac{M_{\mathrm{s}}\sigma_{\mathrm{m}}}{1-\alpha} = \sigma_0 = \sigma_{ys}/1.5$$

：p-M法



APIにおける
許容残存強度係数
RSFa=0.9の根拠

ASME Section XI Div. 1
Case N-597-2（ASME原子力規格）
Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning

TABLE -3622-1

$\frac{L_{m(a)}}{\sqrt{R_{m(a)}t_{m(a)}}}$	Allowable Local Thickness $t_{s(a)}/t_{m(a)}$ -3622.2	-3622.4
0	0.100	0.100
0.20	0.100	0.261
0.23	0.100	0.300
0.26	0.100	0.375
0.32	0.100	0.477
0.38	0.100	0.551
0.45	0.100	0.616
0.50	0.100	0.651
0.60	0.100	0.703
0.70	0.182	0.742
0.83	0.300	0.778
0.85	0.315	0.782
0.90	0.349	0.794
1.00	0.410	0.813
1.20	0.505	0.841
1.40	0.572	0.860
1.60	0.622	0.873
1.80	0.659	0.883
2.00	0.687	0.891
2.25	0.714	0.897
2.50	0.734	0.900
2.75	0.750	0.900
3.00	0.763	0.900
3.50	0.787	0.900
4.00	0.811	0.900
4.50	0.834	0.900
5.00	0.858	0.900
5.50	0.882	0.900
6.00	0.900	0.900
>6.00	0.900	0.900

GENERAL NOTE: Interpolation may be used for intermediate values.

Konosu, S. et al., "Assessment of Overlapped Internal and External Volumetric Flaws in *p-M* Diagram", J. Press. Ves. Technol., 133 , p.031208, (2011).

p－M法の評価結果は、材料の安全係数を合わせることで（特定則の4→ASME原子力容器の3）、ASME原子力規格の評価と一致する

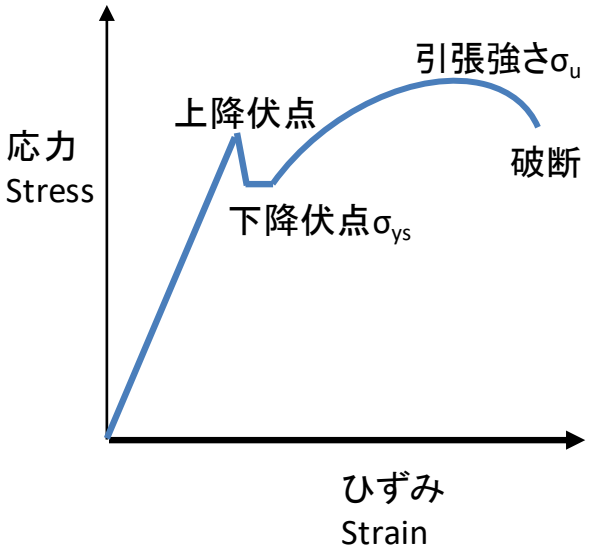
事務局の考え　まとめ

・API法は、以上に示したとおり多くの問題点があることから、減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価基準が具備すべき事項を満たしていないと考えられる。
従って、技術的に安全の確保が十分でない評価手法である。

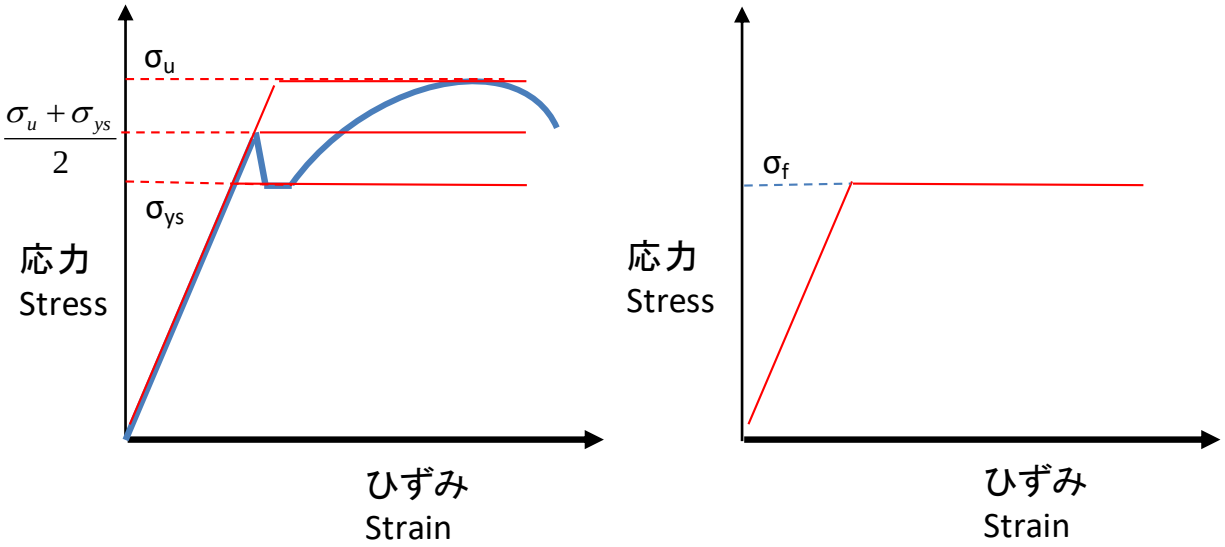
・p-M法は、API法のような問題点はなく、減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価基準が具備すべき事項を満たしていると考えられる。
従って、技術的に安全の確保が十分な評価手法である。

以下　補足説明資料

材料のひずみ硬化特性と弾完全塑性体近似



一般的な炭素鋼の応力ーひずみ線図

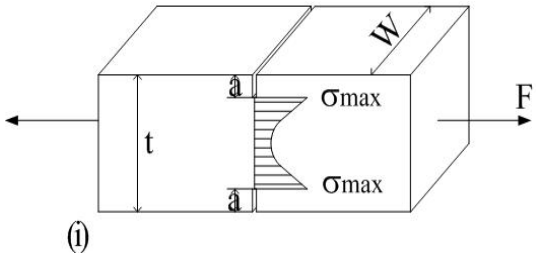


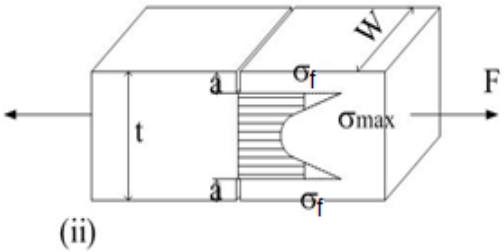
ひずみ硬化塑性体材料の弾完全塑性体近似

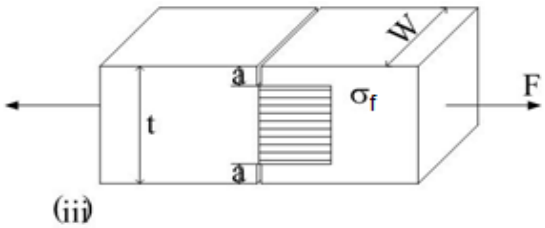
実際の材料はひずみ硬化特性があるが、有限要素法解析（FEM）などの数値解析でなければ考慮は難しい。
従って、減肉評価を行うための一般化した数式を求めるため、材料をひずみ硬化特性を無視した弾完全塑性体（一番右の図）とみなすことが有効となる。

参照応力解とは？

参照応力解とは、材料を弾完全塑性体とみなした時に、欠陥の断面が全断面降伏（＝塑性崩壊）した状態の、力のつり合いの式をいう。



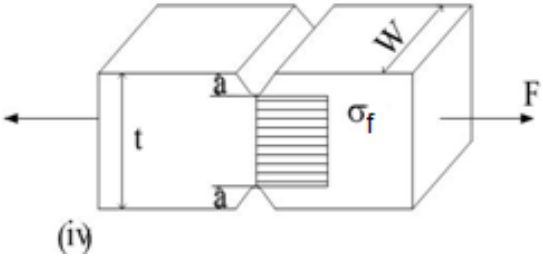


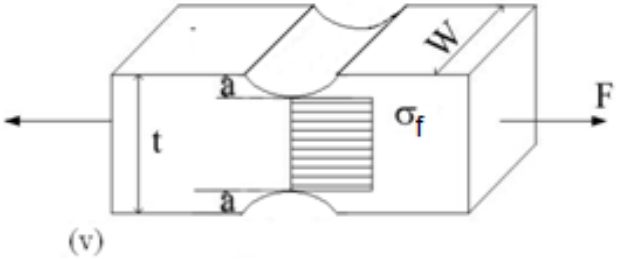


(i)～(iii)　き裂状欠陥形状の場合：　き裂先端は応力集中の影響を受けて優先的に降伏する。しかし、弾完全塑性体とみなしているので、全断面降伏状態である(iii)の参照応力解は次のようになる。

(iii)の参照応力解（き裂状欠陥）

$$\sigma_{ref} = \sigma_{net} = \frac{F}{W(t-2a)} = \sigma_f$$





(iv)(v)の参照応力解（減肉）

$$\sigma_{ref} = \sigma_{net} = \frac{F}{W(t-2a)} = \sigma_f$$

(iv)及び(v)　ノッチ状欠陥（減肉部）の場合：　ノッチ（減肉部）端部はノッチ形状の応力集中に応じて優先的に降伏するが、その応力集中係数はノッチ形状に依存する。しかし、弾完全塑性体とみなしているので、(iv)及び(v)の参照応力解は、き裂状欠陥の場合と同じになる。

➡ **減肉評価とき裂状欠陥評価の参照応力解は同じである。**

欠陥ありの参照応力の導出（つり合い式）(表面貫通欠陥)

$$\begin{cases} \text{力のつり合い：} & L = \sigma_{ys}(t-a-2r) \\ \text{モーメントのつり合い：} & M = \sigma_{ys} r\left(t-a-\dfrac{r}{2}\right) - \sigma_{ys} r \dfrac{r}{2} \\ & \quad = \sigma_{ys} r(t-a-r) \end{cases}$$

ただし、引張荷重：$L = \sigma_m^L t$，曲げモーメント：$M = \dfrac{\sigma_b^L t^2}{6}$

σ_m^L：引張応力の塑性限界，σ_b^L：曲げ応力の塑性限界

参照応力σ_{ref}を次式のように定義して、つり合い式に代入すると、σ_{ref}に関する2次方程式が得られ、これを解いてσ_{ref}を求める。

$$\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_m^L}, \quad \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{ys}} = \frac{\sigma_b}{\sigma_b^L}$$

すなわち、$\sigma_{ref} = \sigma_{ys}$：塑性崩壊条件

２乗

$$\sigma_{ref} = \frac{\frac{1}{3}\sigma_b + \sqrt{\left(\frac{1}{3}\sigma_b\right)^2 + \left\{\left(1-\frac{a}{t}\right)\sigma_m\right\}^2}}{\left(1-\frac{a}{t}\right)^2}$$

$$\begin{cases} \sigma_{ref} = \sigma_{net} = \dfrac{\sigma_m}{\left(1-\dfrac{a}{t}\right)} & \text{：単純引張} \\ \sigma_{ref} = \dfrac{2}{3}\dfrac{\sigma_b}{\left(1-\dfrac{a}{t}\right)^2} & \text{：単純曲げ} \end{cases}$$

cf. A.A. Willoughby et al., ASTM STP 1020, (1989)

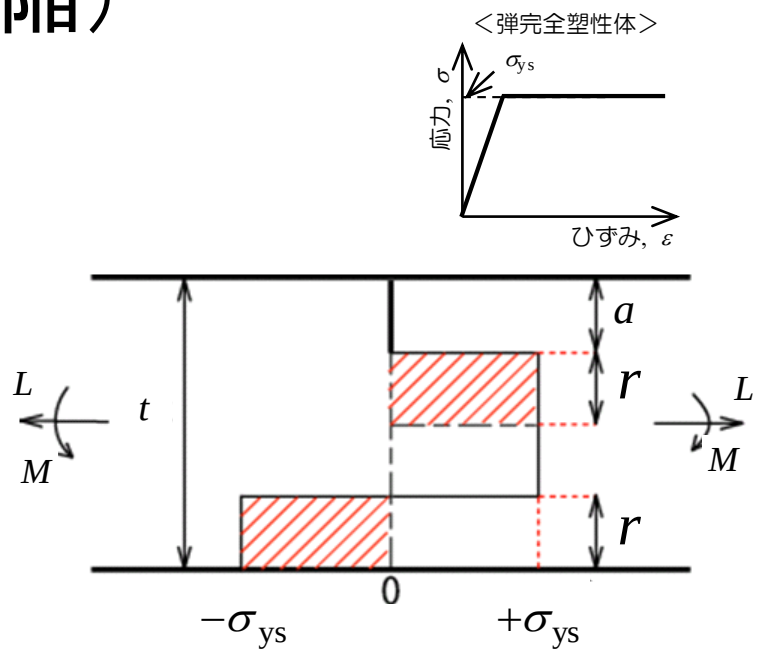
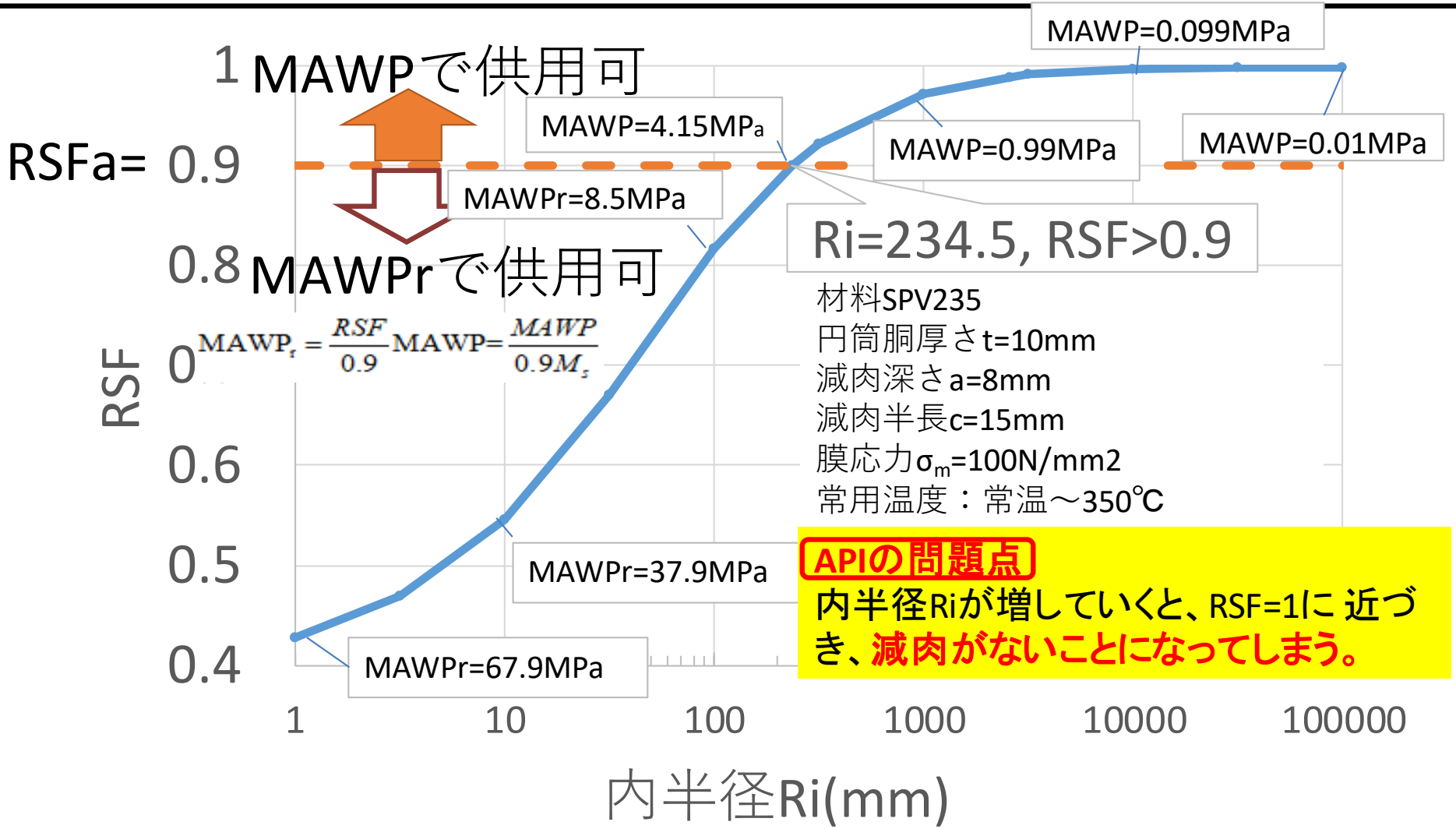
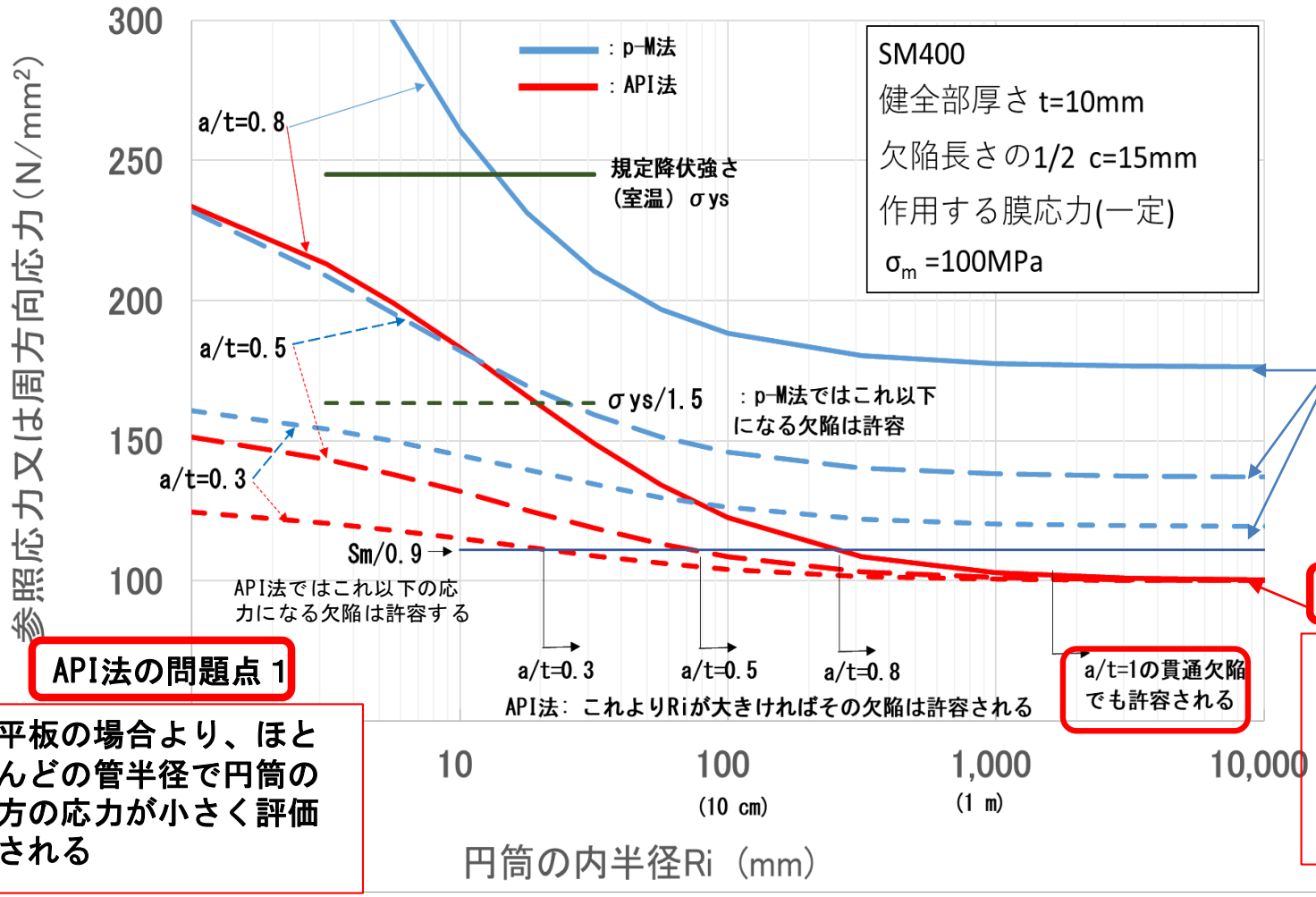


図　引張荷重Lと曲げモーメントMが同時に働いて全断面降伏した深さaの欠陥のある部材：曲げモーメントが働くため、残断面には引張力と圧縮力が生じて、つり合い状態が達成されている。
発生する応力は降伏応力σ_{ys}で頭打ちになる。これは、安全側評価のため「弾完全塑性体」考えているからである。

API法減肉評価におけるRSFと内半径及びMAWP（最高許容使用圧力）の関係



API減肉評価及びき裂状欠陥評価における参照応力解の本質的な欠陥



p-M法では、平板のそれぞれの欠陥深さで生じる応力に漸近する

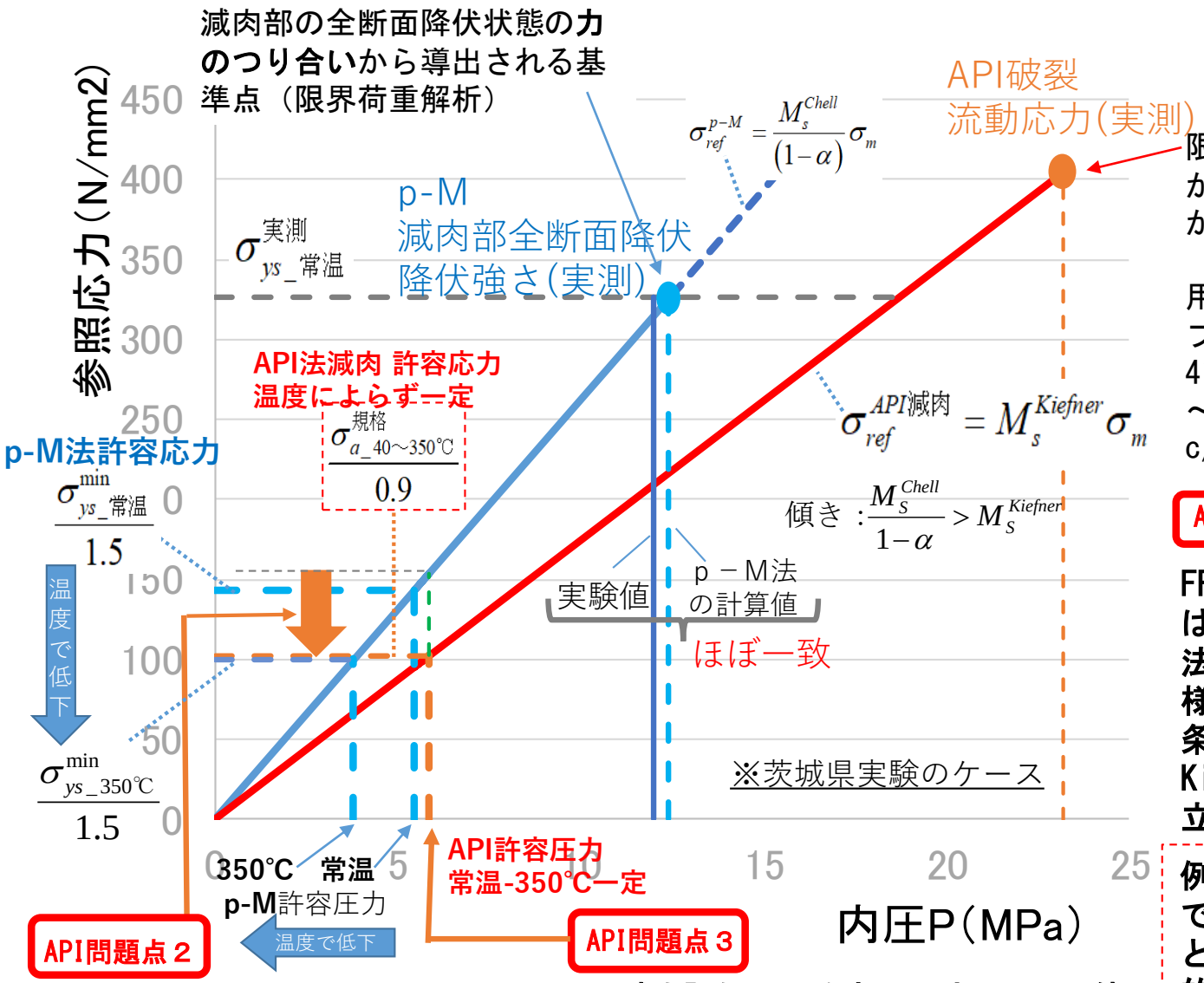
API法の問題点２

API法では、大径管になると欠陥の有無に関わらず健全円筒の膜応力に漸近する

API法の問題点１

平板の場合より、ほとんどの管半径で円筒の方の応力が小さく評価される

p-M法とAPI法の減肉の応力評価の考え方の違いとAPIの問題点



限られた試験条件からKiefnerが破裂データから導いた**実験式**から決まる基準点

用いた条件：材質：ラインパイプ材X50～X60(σys>=358～413MPa)，Ri/t=31～48(Do=406～1067mm，t=6.35～15.6mm)，c/t=4.3～23.6，試験温度=常温

API問題点１

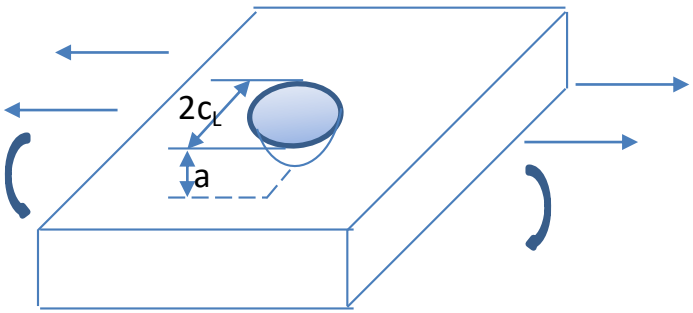
FFS規格で対象とする実機では、材料、円筒寸法、欠陥寸法、使用温度などが極めて多様で広範囲であり、この試験条件以外の条件に対してKiefnerの実験式が広範に成り立つと考えることは非合理的

例えば、円筒寸法（大径管）では欠陥寸法に関係しない式となっている（危険側の本質的な問題）。

評価する内圧に対する参照応力を算定すると、常にAPI法ではp-M法よりも過小評価(危険側）する。

API減肉評価では許容引張応力の1.11倍で最高許容使用圧力が決まり温度依存性がなく、高温で設計規格の塑性崩壊限界を満足しない(危険側）　。

解説：平板の局部減肉等の表面欠陥の平板の表面貫通欠陥への置換



前スライドより
平板の表面に貫通欠陥がある場合の参照応力

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1-\frac{a}{t}}$$

Willoughbyら(1989)

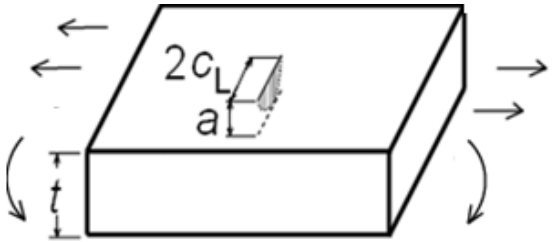
$$\alpha = \frac{a_{eff}}{t} = \frac{a \cdot 2c_L'}{t\left(2c_L' + 2t\right)} = \frac{\pi a c_L}{t\left(\pi c_L + 4t\right)}$$

※ここでは、曲げ応力は無視する。

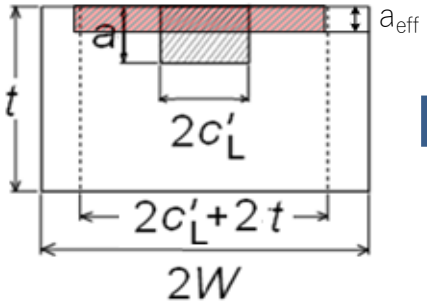
$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1-\frac{a_{eff}}{t}} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1-\alpha}$$

平板表面に局部減肉がある場合の参照応力

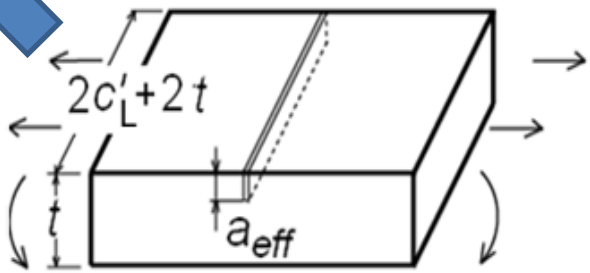
減肉をき裂状欠陥とみなす



無限幅の板の表面に表面長さ$2c_L$、深さaの半楕円欠陥がある場合



半楕円欠陥を同面積かつ同深さaの矩形欠陥に置換え

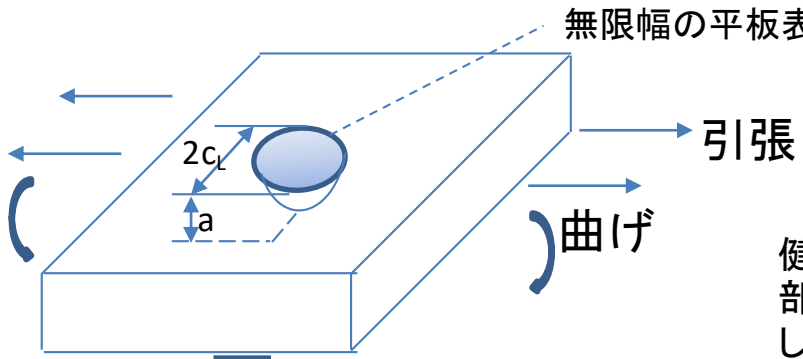


有限幅（2cL'＋2t）の相当貫通表面欠陥（深さa_{eff}）に置換 （ $W \geq \frac{\pi}{4}c_L + t$のとき）

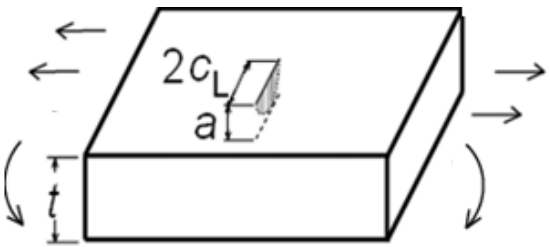
Williughbyら(1989)

以上は、円筒の場合でも同様に適用可能である

無限幅の平板の表面半楕円欠陥と等価な有限幅の平板の表面貫通欠陥の置換（Willoughbyら1989）



減肉をき裂状欠陥とみなす



無限幅の平板表面に表面長さ$2c_L$、深さaの半楕円欠陥がある場合

$$\frac{\pi a c_L}{2} = 2 a c_L'$$

半楕円欠陥を同面積かつ同深さaの矩形欠陥に置換え

平板の表面に局部減肉がある場合の参照応力

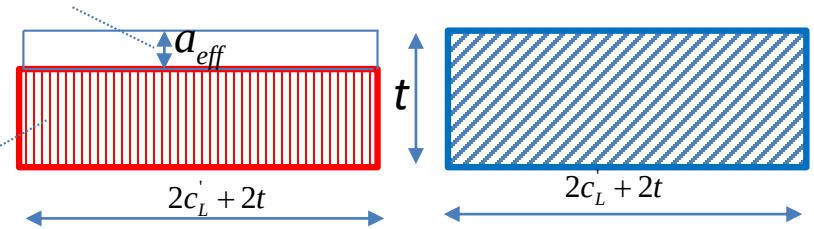
※ここでは、平板に生じる曲げ応力は無視する。

Willoughbyら(1989)

$$\alpha = \frac{a_{eff}}{t} = \frac{a \cdot 2c_L'}{t\left(2c_L' + 2t\right)} = \frac{\pi a c_L}{t\left(\pi c_L + 4t\right)} \qquad \sigma_{ref} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1 - \frac{a_{eff}}{t}} = \frac{\sigma_{m_健全部}}{1-\alpha}$$

健全部にも欠陥のリガメントにもかかっている力は同じ。よって、健全部の応力をσ_mとすればリガメントには断面積の減少分反比例で増加し$1/(1-a_{eff}/t)$倍になる。（ex.a_{eff}がt/2ならリガメントの応力は2倍）

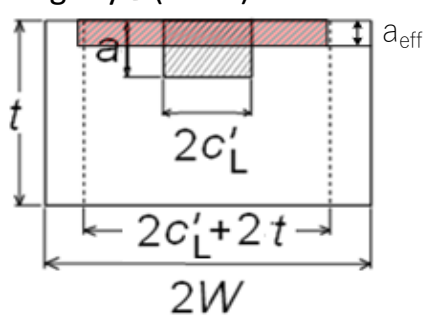
深さa_{eff}の相当表面貫通欠陥

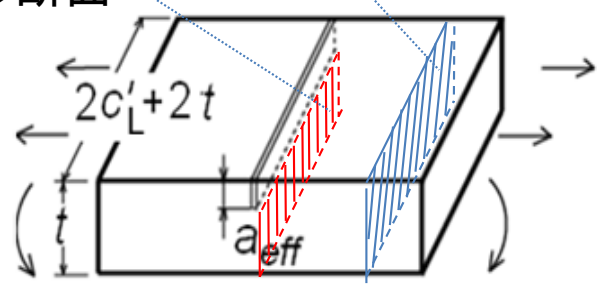


残厚部（リガメント）

欠陥部の断面　健全部の断面

Willoughbyら(1989)





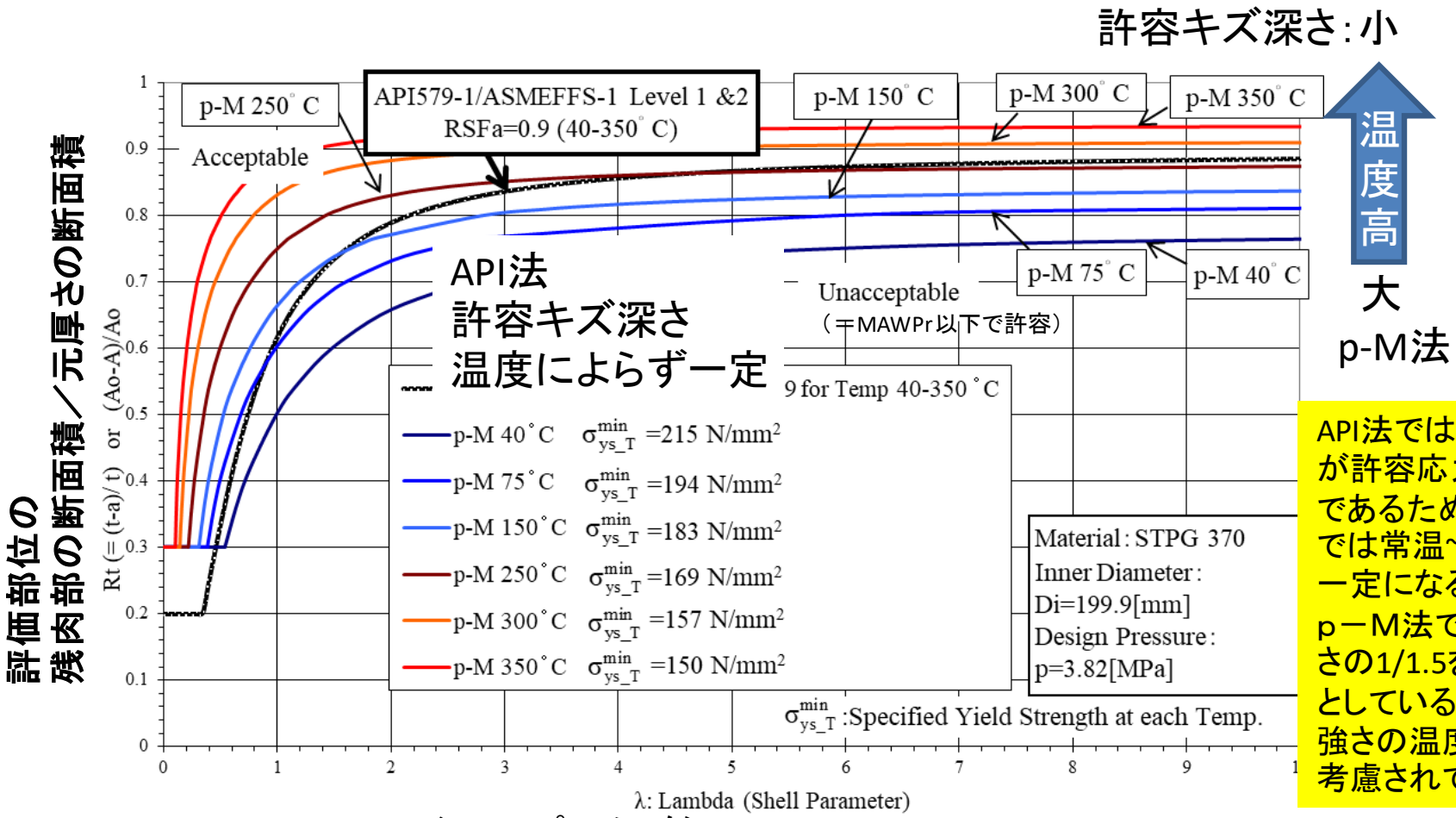
有限幅（$2cL'+2t$）の相当貫通表面欠陥（深さa_{eff}）に置換　（ $W \geq \frac{\pi}{4} c_L + t$　のとき）

考えるモデルの幅Wについて、
欠陥の影響範囲、すなわち欠陥の存在により優先して全断面降伏する範囲を$2c_L' + 2t$として、Wが影響範囲以上に大きければ影響範囲を有限幅とする断面で考える。（実際の設備ではWは十分大きいものとしてp-M法ではWが影響範囲より小さい場合については省略している。）

なお、短く深い減肉の場合、Willoughbyの提案は危険側なのでp-M法では補正している。BS7910にも補正の必要があるとの記載あり。

p-M法では降伏強さの温度依存性が考慮されている

p-M法では適切なクライテリオン（降伏強度による欠陥前方での全断面降伏を与える限界荷重の裕度1.5を常に保持する）を設定するため、使用温度が上がれば、降伏応力が低下するため、許容される欠陥深さは小さくなるという、温度効果を考慮することができる



API法では判定基準が許容応力の1.1倍であるため、炭素鋼では常温~350℃まで一定になる。
p－M法では降伏強さの1/1.5を許容基準としているため、降伏強さの温度依存性が考慮されている。

λ: $Lambda$(シェルパラメータ): **管軸方向への減肉欠陥の広がり**

Ref: **Oyamada, et al., IJPVP, 88, pp. 507-517, 2011.**

ｐ－M法の評価式：実験及び解析結果との比較検証

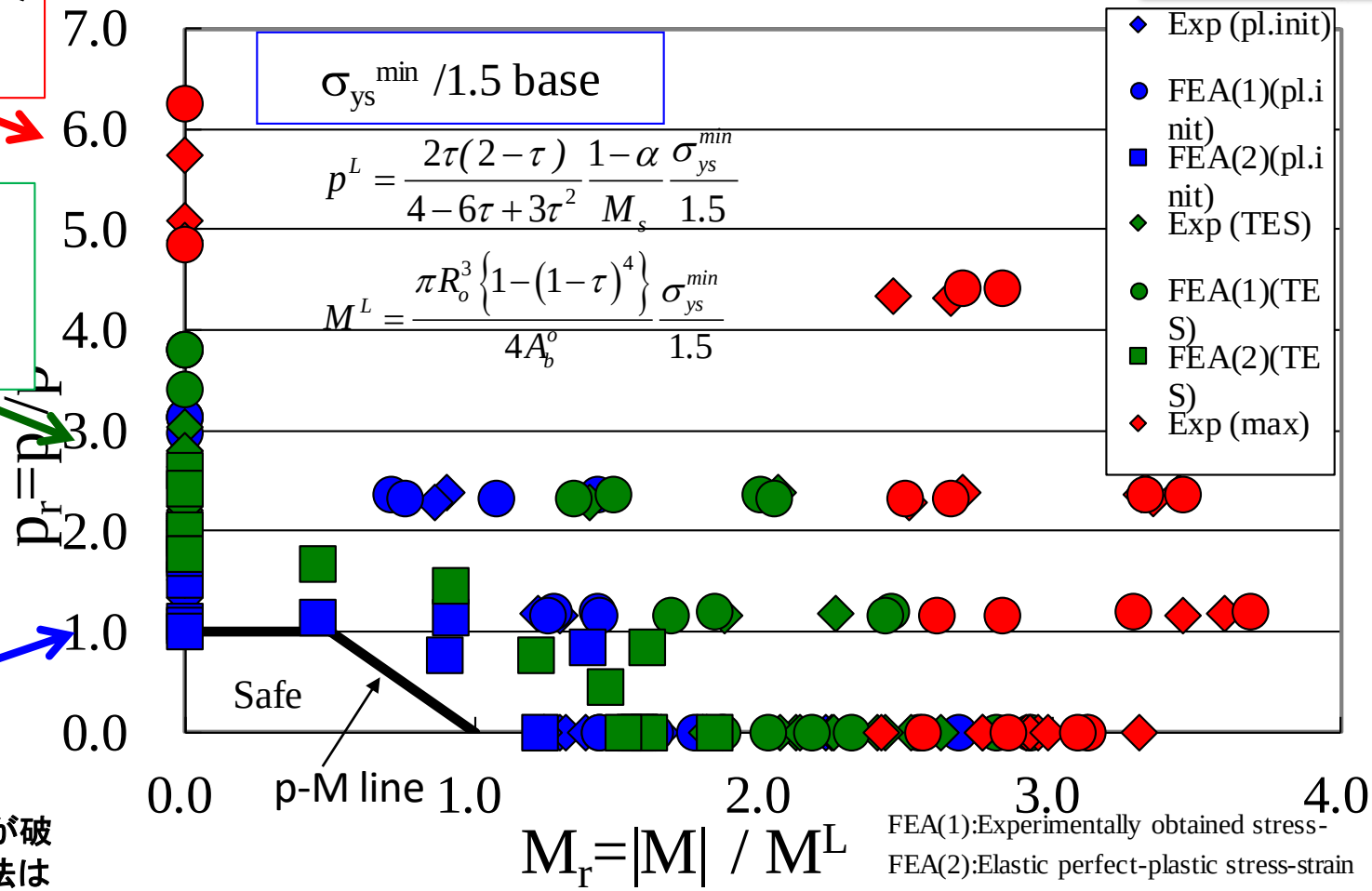
3.減肉欠陥破裂
（API法基準値）
Pr=2.5-6.5

2.減肉欠陥部全断面降伏
（p-M法基準値）
Pr=1.5-4.0

1.減肉欠陥部塑性変形開始Pr=1.0-3.0

(S. Konosu et. Al., ASME J. Pressure Vessel Technol., 131 pp.021206-1 to 10 (2009))

All limit loads



FEA(1):Experimentally obtained stress-
FEA(2):Elastic perfect-plastic stress-strain

Plastic initiation, TES and plastic instability loads at LTA plotted on Ibaraki FFS p - M diagram based on $\sigma_f = \sigma_{ys}^{min}/1.5$

API法では減肉欠陥部が破壊する点を考え、p-M法は減肉欠陥部が全断面降伏する点で考えているのでp-M法の方が安全側の予測をする

ｐ－M法は、内圧と地震等による曲げモーメントを受ける減肉部の全断面降伏の評価に適していることが検証されている。

減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価のための基準が具備すべき事項に関するp－M法とAPI法の比較

① 判断基準となる応力 － 参照応力 － の妥当性（つり合い条件、平板と円筒の連続性）

- 参照応力：欠陥のFFSにおいて最も重要なもので、欠陥部の健全性の判断に用いる応力
- つり合い条件：力学の基本原理で、物体に働くすべての力はこの条件を満足する

➢ p−M法：

- つり合い条件から求めた平板の参照応力解（p−M法、API法共通）を円筒へ拡張した参照応力解を採用しており、論理的な拡張を行って円筒でもつり合い条件を満たしていることを確認している
- p−M法の円筒の参照応力解の導出はASMEジャーナル他で公開されており、実験や解析で検証されている
- p−M法の円筒の参照応力解は平板の参照応力解と連続性があり矛盾しない

➢ API法：問題あり

- つり合い条件から求めた平板の参照応力解（同上）を円筒へ拡張した参照応力解を採用しているが、拡張の仕方が論理的でないため円筒ではつり合い条件を満たしていることが確認できない
- API法の円筒の参照応力解の導出についてASME PVP2020発表論文にて初めて発表されたが、その導出過程は合理的でない
- API法の円筒の参照応力解は、力学的なつり合い条件を満足しておらず許容できるものではなく、平板の参照応力解とも連続性がなく内半径の増加とともに欠陥の影響がなくなるなど本質的な（危険な）問題がある

減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価のための基準が具備すべき事項に関するp－M法とAPI法の比較

② 判定基準に材料の降伏強さの温度依存性が考慮されていること

- 材料の降伏強さ: 塑性崩壊評価において最も重要な材料の特性であって、材料変形の比例限界（降伏点を超えると変形が元に戻らなくなる）である
- 温度依存特性: 材料の降伏強さは温度が上昇すると低下する性質があり、塑性崩壊評価における判定基準には降伏強さが基準となる
- 材料の許容引張応力：設計における応力の判定基準で、特定則別添1ではMIN（引張強さ/4、降伏強さ/1.5）で、炭素鋼では350℃までは引張強さが支配するのが一般的

➢p−M法：

－ 判定基準を降伏点に対して1．5の安全裕度をとっており、設計規格の塑性崩壊の許容基準と同じである

➢ API法：

－ API法減肉評価では判定基準が許容引張応力の1.1倍であり、炭素鋼では判定基準が常温から350℃までは変らず、降伏強さの温度依存性は考慮していない

－ 許容引張応力の1.1倍としていることで、高温で降伏点が低下したとき、降伏強さ/1．5以下より高い応力を許容する場合があるなど、設計規格の塑性崩壊の許容基準を満足しない。

減肉及びき裂状欠陥評価の塑性崩壊評価のための基準が具備すべき事項に関するp－M法とAPI法の比較

③減肉やき裂状欠陥の安全性の限界を塑性崩壊限界（全断面降伏）とすること

- p−M法
  - p−M法では、JISB8266規格などの圧力容器設計規格及び英国のFFS規格BS7910と同様、塑性崩壊限界（減肉部の全断面降伏）を安全性の限界として、参照応力解及び判定基準を定めている
  - p－M法では、塑性崩壊荷重（減肉部の全断面降伏）をリーズナブルに算定でき、判定基準に裕度1.5を採用することで、欠陥前面の残厚部（リガメント）が全断面降伏することを防止し、減肉等を有したまま設備の継続運転が可能かどうかの判断を可能としている。

- API法
  - API規格の減肉評価では、減肉部等が破壊する点を安全限界と考えている。
  - API規格の減肉及びき裂状欠陥評価の参照応力解は欠陥部が破壊する点を限界としており、塑性崩壊限界（減肉部の全断面降伏）を過小評価するため、判定基準が設計規格の考え方とも異なることで、非常に危険な評価を行う可能性があるため、減肉等を有したまま設備の継続運転が可能かどうかの判断には適さない。