

信頼性工学の背景

東京大学大学院

酒井信介



内容

- 背景
- 規格開発状況
 - RBM(日本高圧力技術協会)
 - JIS(日本高圧力技術協会, 日本機械学会)
 - 減肉(日本高圧力技術協会)
- 資格認証(日本高圧力技術協会)
- 今後に向けて



背景

1. 機械構造物の安全性・信頼性向上に向けて、規制・基準の厳格化によって対応する傾向
2. このような方式の長短を整理する必要(決定論的方式, 確率論的方式)
3. 単純に全てについて厳格化する方式には落とし穴がある
4. 確率論的取扱い, 信頼性工学を普及するための取組が必要



許容値厳格化の背景



日本

事業者の責任追及・刑事責任と連動

マスコミ・社会からの非難

厳格な規制・基準、組織の見直し

無用な厳格規制により合理的保全未達成

発行された規制の緩和は極めて困難

欧米

責任追及よりは原因究明・再発防止が主

概念のリセット・再構築

社会的コンセンサスの形成

新概念に基づいた規制基準、組織作り

発行された規制はリスクに基づき柔軟に変更

リスク概念とは

日本流

危険

安全

欧米流

危険

安全

意思決定に対するリスクの導入

安全の定義(ISO/IECガイド51)

受入れ不可能
な領域

受容できないリスク
が存在しないこと



我慢できる
または
ALARP領域

ALARPの原則

As Low As Reasonably Practicable

広く受入れ可能
な領域

無視できるリスク

許容値方式の問題点

リスク方式

許容値方式

受入れ不可
可能な領域

安全

大半の機器
がリスクを
保有してい
るという認
識のもとに
つねりリス
クを下げる
努力をする

我慢できる
または
ALARP領域

許容値

危険

安全

広く受入れ可能
な領域

無視できるリスク

「安全」というラベルを
貼ったために努力しな
くになってしまう

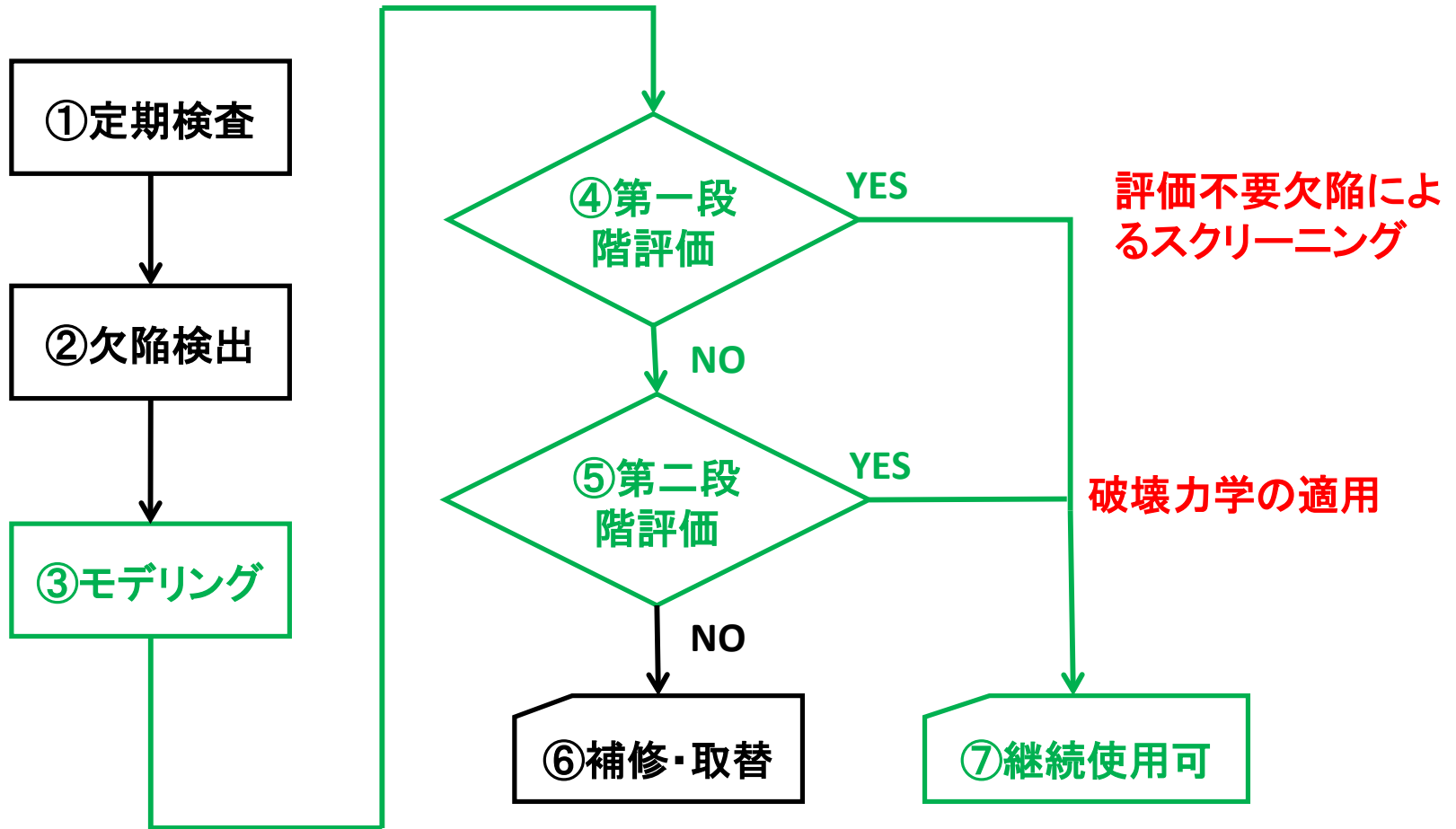
努力をして
も一切認め
られない

内容

- 背景
- 規格開発状況
 - RBM
 - JIS
 - 減肉
- 資格認証
- 今後に向けて



維持規格の考え方

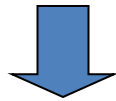


維持規格の次に必要になるもの

設計・製造規格→メンテナンス規格(維持基準)

発行

欧米ではメンテナンス規格の経験が長い

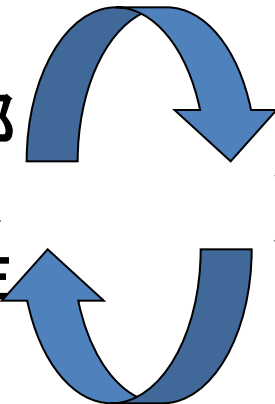


画一的なメンテナンスプログラムは合理性を損なう

規格上の検査対象部位と実際の材料の損傷部位が無相関

わが国の対応

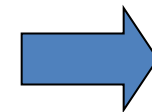
非検査部
からの損
傷の発生



検査対象部
位に追加

行き着く果て

全範囲の高
頻度検査



論外

画一的検査方式の問題点

- 画一的検査方式:決まった検査箇所を決まった時期に決まった方法で実施
- 新規プラントでは問題表面化しない
- 老朽化にともない、検査から判断される損傷の状況と、検査プログラムとの間に乖離が見られる
- 新規技術の導入、プログラムの変更など柔軟な対応がむずかしい

英文版

HPIS

リスクベースメンテナンス

Risk Based Maintenance

HPIS Z 106 : 2010

2010年3月26日制定
社団法人日本高圧力技術協会
High Pressure Institute of Japan

著作権法により印刷での複製、転載等は禁止されております。

HPIS

リスクベースメンテナンス
ハンドブック

Risk Based Maintenance Handbook

第1部 : 一般事項

Part 1 General

HPIS Z 107-1TR:2011

HPIS

リスクベースメンテナンス
ハンドブック

Risk Based Maintenance Handbook

第3部 : 応力腐食割れの損傷係数

Part 3 Stress Corrosion Cracking Damage Factor

HPIS Z 107-3TR:2010

2010年3月26日制定
社団法人日本高圧力技術協会
High Pressure Institute of Japan

著作権法により印刷での複製、転載等は禁止されております。

HPIS

リスクベースメンテナンス
ハンドブック

Risk Based Maintenance Handbook

第2部 : 減肉の損傷係数

Part 2 Wall Thinning Damage Factor

HPIS Z 107-2TR:2010

HPIS

リスクベースメンテナンス
ハンドブック

Risk Based Maintenance Handbook

第4部 : その他の損傷係数

(材質劣化外面損傷等の損傷係数)

Part 4 Other Damage Factor

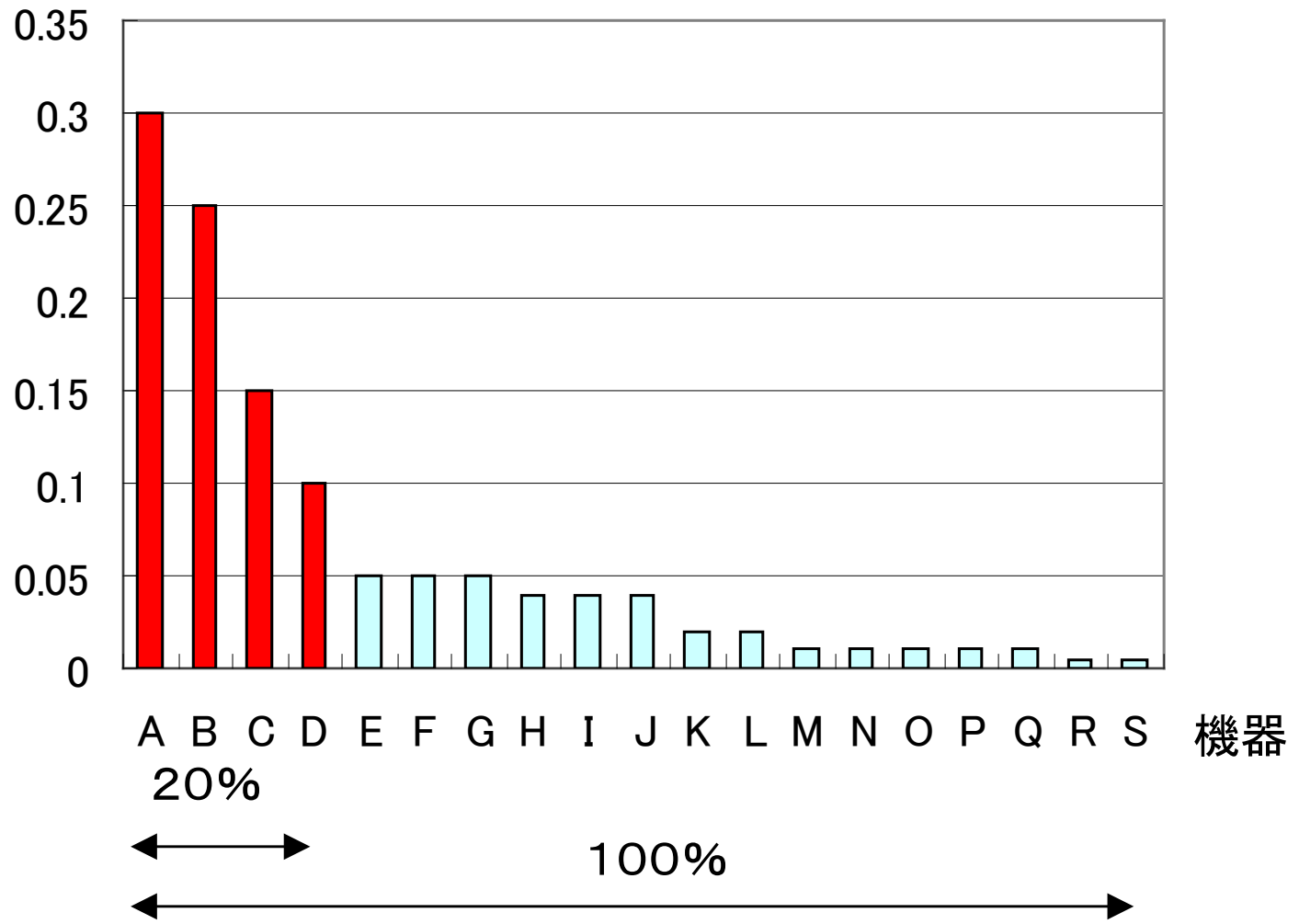
HPIS Z 107-4TR:2011

2011年4月7日制定
社団法人日本高圧力技術協会
High Pressure Institute of Japan

著作権法により印刷での複製、転載等は禁止されております。

80-20の経験則（パレート則）

相対リスク



RBMにおけるリスクの定義

リスク = 損傷発生確率 x 影響度

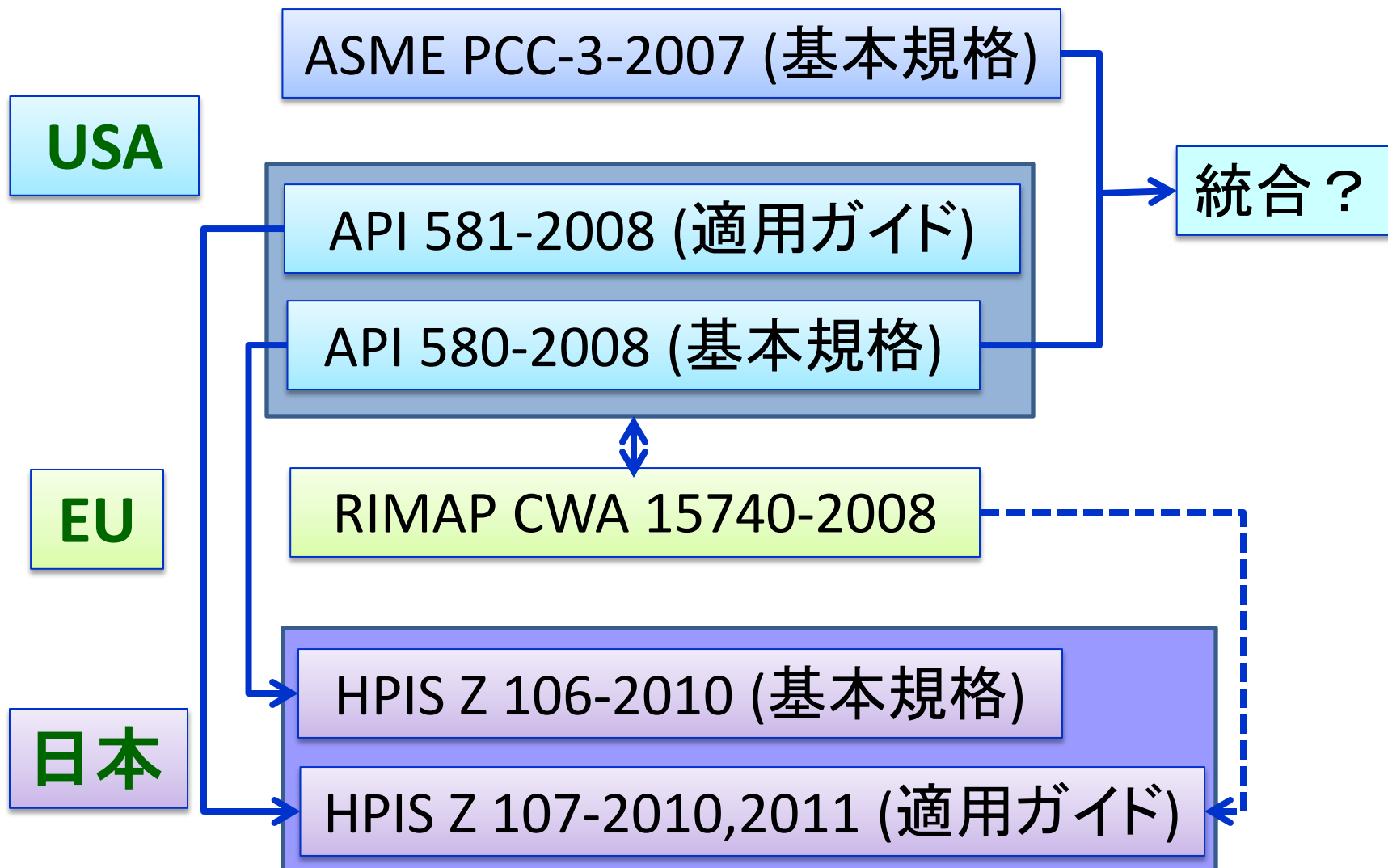
損傷モードの特定



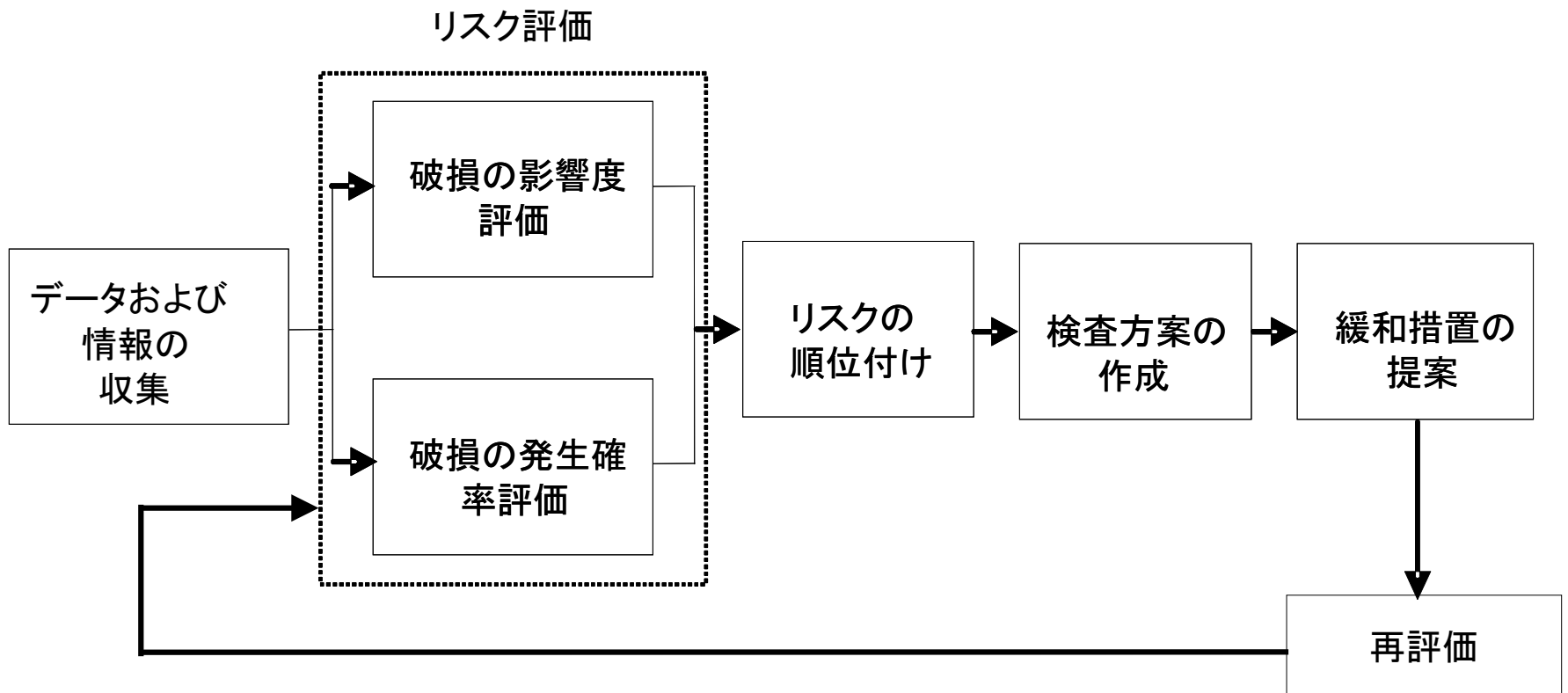
損傷モードの発生確率

損傷の発生による
影響の程度

諸外国の規格との関係



HPI-Z106の手順



代表的影響度のカテゴリー

API580 2nd Edition

カテゴリー	安全(S)	健康(H)	環境(E)
高	後遺症の残る致命的もしくは重症	健康に長期にわたる影響大	オフサイトの重大なクリーンアップが求められる事象
中	完全復帰までに長時間を要する	健康への影響は短期間であり、完全復帰できる	オンサイトでの軽度ではあるが、重大事態になり得る事象
低	簡易治療程度の軽傷	最小限の健康影響	軽度のオンサイト事象

内容

- 背景
- 規格開発状況
 - RBM
 - JIS
 - 減肉
- 資格認証
- 今後に向けて



日本機械学会・分科会 研究会活動

主査:東京大学 酒井信介、幹事:日本原子力研究開発機構 浅山 泰

名称	機械構造物の設計・維持への荷重・耐力係数分科会
設置期間	2008年4月～2010年3月末(材料力学部門・動力エネルギー部門)

名称	荷重・耐力係数法による信頼性評価の実用化に関する研究分科会
設置期間	2010年4月～2013年3月末(材料力学部門)



名称	学会基準「機械構造物の信頼性に関する一般原則」開発研究会
設置期間	2013年4月～2015年3月末(材料力学部門)

名称	経産省事業「機械製品の信頼性に関する一般原則」に関するJIS開発」
設置期間	2014年6月～2016年3月末(日本高圧力技術協会)

限界状態設計の推進に寄与

General principles on reliability for structures
ISO2394 Third edition



ISO 8686-1(1989)
[Cranes-Design principles for loads and load combinations:Part1 General

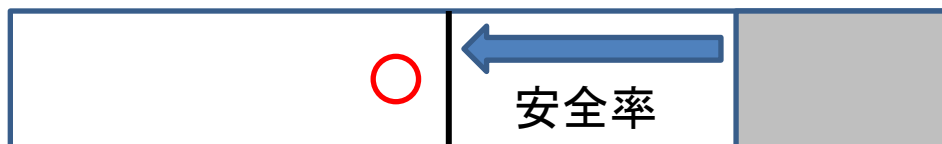
ISO 8686-2(2004)
[Cranes-Design principles for loads and load combinations:Part2 Mobile cranes

例

機械製品の信頼性に関する一般原則
JIS規格が必要

信頼性に基づく設計・維持

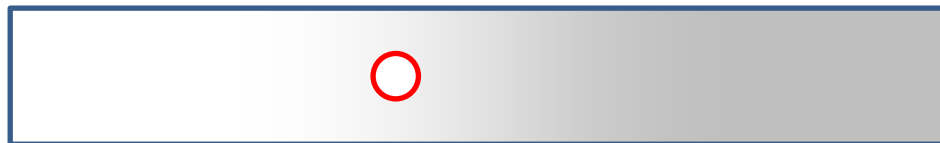
許容応力評価



判定が容易

ばらつきに対する余裕の大きさが明瞭でない

信頼性評価
(限界状態設計)



要求が満足できなくなる限界の状態を明確化
荷重・強度のばらつきの影響を詳細に考慮する
⇒ 技術的進歩・要求性能の多様化に対応可能
実評価への導入が望まれる

信頼性に関する一般原則の必要性

ISO2394:1998

General principles on reliability for structures
(構造物の信頼性に関する一般原則)

- 土木・建築分野を主要な対象として開発されたISO
- 信頼性を明確にする限界状態設計の原則を与え、限界状態設計を採用した規格・基準類の基盤となる

我が国の機械製品分野においても、
これに相当する一般原則をJISとして策定することで、
信頼性設計の普及促進に繋がると考えられる

機械構造物の信頼性設計ガイドライン

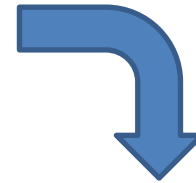
日本機械学会

材料力学部門 P-SCD373

荷重・耐力係数法による信頼性評価の実用化に関する研究分科会

2013年3月

技術的詳細、解説等
(分科会・研究会活動)



日本機械学会基準

荷重・耐力係数設計法（概念）

LRFD: Load and Resistance Factor Design

- 破損を式で表現する.

$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$$

x_1, x_2, \dots, x_n は, 荷重や強度などの設計パラメータ

$G(x_1, x_2, \dots, x_n)$ は損傷モードごとに定義→FTAの活用

- 変数のばらつきを考慮する

– 最も厳密な表現は確率密度関数 $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$

- 破損確率を計算する

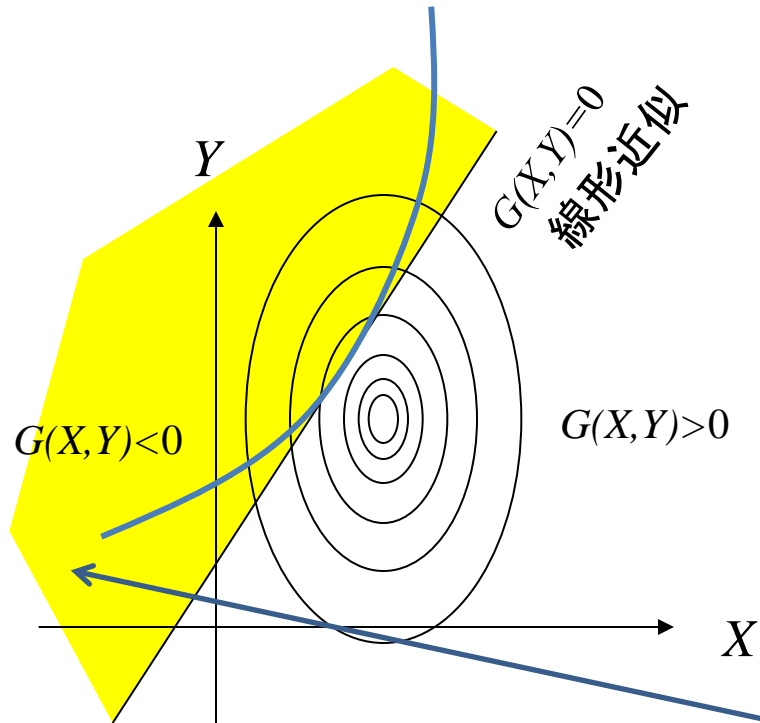
$$P_f = \iiint_{G \leq 0} f_1(x_1) f_2(x_2) \cdots f_n(x_n) dx_1 dx_2 \cdots dx_n$$

- $P_f = P_{f0}$ を目標値として設計変数を決定する

限界状態関数と破壊確率

真の限界状態関数

$$G(X, Y) = 0$$



$$Z_i = g_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

に変換して考察



安全裕度の定量的表現

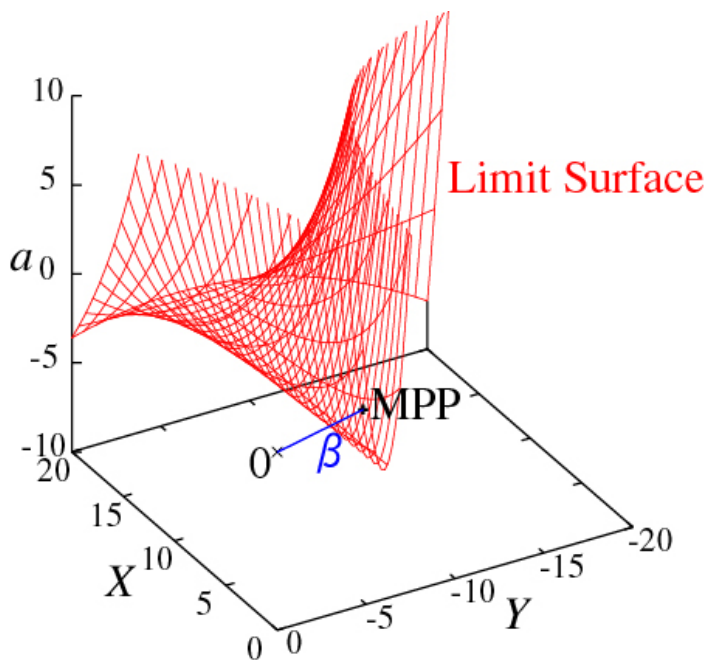
限界を越える事象が発生する確率の定量的評価



設計時における信頼性設計の活用法

- 限界状態関数法により、目標信頼性を実現するための設計可能
- 信頼性工学的知識とプログラミングなどの計算負荷がかかる→設計者には負荷大
- 簡単な係数表と電卓程度の計算から、信頼性設計をしたい
- 限界状態関数法で、目標信頼性ごとに係数表を作成しておき設計に活用
→部分安全係数表

PSF の概念



MPP: Most Probable Point

x_i^* : MPP

荷重に対するPSF

$$\gamma_{li} = \frac{x_i^*}{\mu_{xi}}$$

強度に対するPSF

$$\gamma_{si} = \frac{\mu_{xi}}{x_i^*}$$

安全照査

$$G(\underbrace{\gamma_{l1} \cdot x_1, \gamma_{l2} \cdot x_2, \dots}_{\text{荷重}}, \underbrace{\frac{x_n}{\gamma_{sn}}}_{\text{強度}}) > 0$$

メンテナンスへの適用例 (部分安全係数表)

荷重のばらつき
に応じて

係数が一定となる
範囲の設定

目標信頼性

Table 9.2
Partial Safety Factors For The Assessment Of Crack-Like Flaws

Shallow Cracks: $a < 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Probability Of Failure Category (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{ky} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{ky} > R_c$ (5),(6)		
			PSF_s	PSF_k	PSF_a	PSF_s	PSF_k	PSF_a
$p_f = 2.3(10^{-2})$ ($\beta = 2.0$)	0.10	1.0	1.20	1.43	1.08	1.25	1.0	1.0
	0.20	1.0	1.30	1.43	1.08	1.50	1.0	1.0
	0.30	1.0	1.55	1.43	1.08	1.75	1.0	1.0
$p_f = 10^{-3}$ ($\beta = 3.09$)	0.10	1.4	1.40	1.43	1.20	1.50	1.0	1.0
	0.20	1.4	1.50	1.82	1.10	2.0	1.0	1.0
	0.30	1.4	2.00	2.0	1.05	2.50	1.0	1.0
$p_f = 10^{-6}$ ($\beta = 4.75$)	0.10	2.0	1.75	2.0	1.35	2.00	1.0	1.0
	0.20	2.0	2.50	2.0	1.50	3.10	1.0	1.0
	0.30	2.0	2.6	2.0	1.50	4.10	1.0	1.0
Deep Cracks: $a \geq 5 \text{ mm}$ (0.2 inches) (1)								
Probability Of Failure Category (2)	COV_s (3)	R_c (4)	$R_{ky} \leq R_c$ (5),(6)			$R_{ky} > R_c$ (5),(6)		
			PSF	PSF	PSF	PSF	PSF	PSF

国内の信頼性関連動向

- 日本高圧力技術協会 HPIS Z 109TR:2016
信頼性に基づく圧力設備の減肉評価方法
- 日本クレーン協会規格 JCAS 2016
移動式クレーンの構造部分に限界状態設計法を適用する場合の指針
- 日本機械学会基準
部分安全係数法を用いた機械製品の信頼性評価に関する指針 → 審査中
- 日本機械学会 発電用設備規格ガイドライン
(高速炉機器、審議中)
今後、これらの活動の成果に基づき、信頼性評価に係る一連の規格基準体系が構築されることが望ましい。

JIS B 9955:2017

「機械製品の信頼性に関する一般原則」

第1章 適用範囲

第2章 用語及び定義

第3章 記号

第4章 要求事項および概念

第5章 限界状態設計の原則

第6章 基本変数

第7章 解析モデル

第8章 確率に基づく設計の原則

第9章 部分係数法による設計

第10章 供用期間中の機械製品の評価

附属書A(参考)品質管理と品質保証

附属書B(参考)持続荷重、過渡荷重及び偶発荷重の例

附属書C(参考)累積破損のモデル

附属書D(参考)実験モデルに基づく設計

附属書E 信頼性に基づく設計の原則
解説

将来の信頼性規格体系（イメージ）

一般原則

作成したJIS原案
(ISO2394に対応)

一般的な評価手法

部分安全係数法 (JSME基準案)

個別対象への展開

配管減肉
移動式クレーン など

今回作成したJIS原案が、規格基準体系を構築する上で
基盤として活用されることを期待したい。

内容

- 背景
- 規格開発状況
 - RBM
 - JIS
 - 減肉
- 資格認証
- 今後に向けて



信頼性に基づく減肉評価法 専門研究委員会(HPI)

- 通称MLR(Metal Loss assessment based on Reliability)委員会
- 2012年4月発足, 委員長: 酒井(東京大学)
- 信頼性に基づく減肉評価基準の作成検討
- 関連する技術データの蓄積
 - バースト試験
 - 厚さ測定値のばらつき特性調査
 - 内圧以外の荷重が負荷されるとき挙動調査



局部腐食(外面腐食の例)



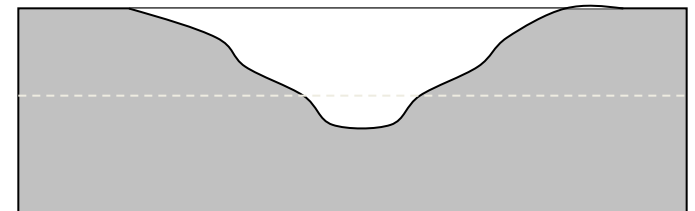
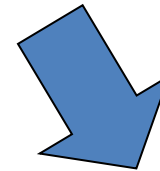
局部減肉とFFS(問題点)

圧力容器は設計肉厚を割ってはいけない



↑ ↓ 設計肉厚

(a)



(b) どちらの強度が高い?? (c)

活動概況

- (第一期)2012年度からの2年間で各種検討を実施し、検討成果を公開



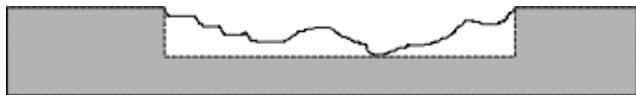
圧力技術 Vol. 52(2014) No. 2
信頼性に基づく減肉評価特集号

ASME PVP Conference 2017(Hawaii)にて
成果の一部発表予定

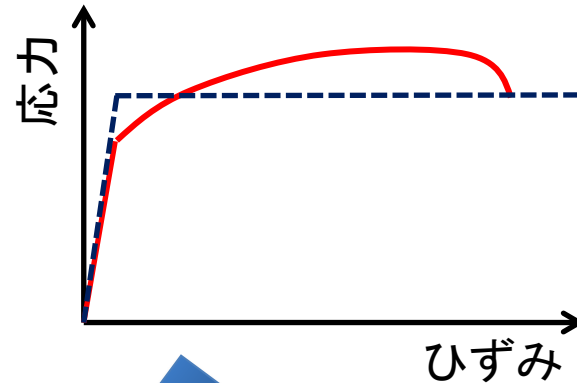
- (第二期)2014年度より2年間で規格開発、
- HPIS Z 109TR:2016を発行済

局部減肉評価法の基本事項

減肉の幾何学形状
のモデル化



材料の機械的特性(変形特性)のモデル化



$$L_{DC} = \frac{1 - \frac{A}{A_o}}{1 - \frac{1}{M_t} \frac{A}{A_o}} L_{UC}$$

減肉容器の塑性崩壊荷重

健全容器の塑性崩壊荷重

決定論的評価手法 (最高許容使用圧力 $MAWP_r$ の算定)

$$L_{DC} = \frac{1 - \frac{A}{A_o}}{1 - \frac{1}{M_t} \frac{A}{A_o}} L_{UC}$$

減肉容器の塑性崩壊荷重 健全容器の塑性崩壊荷重



RSF : 残存強度係数

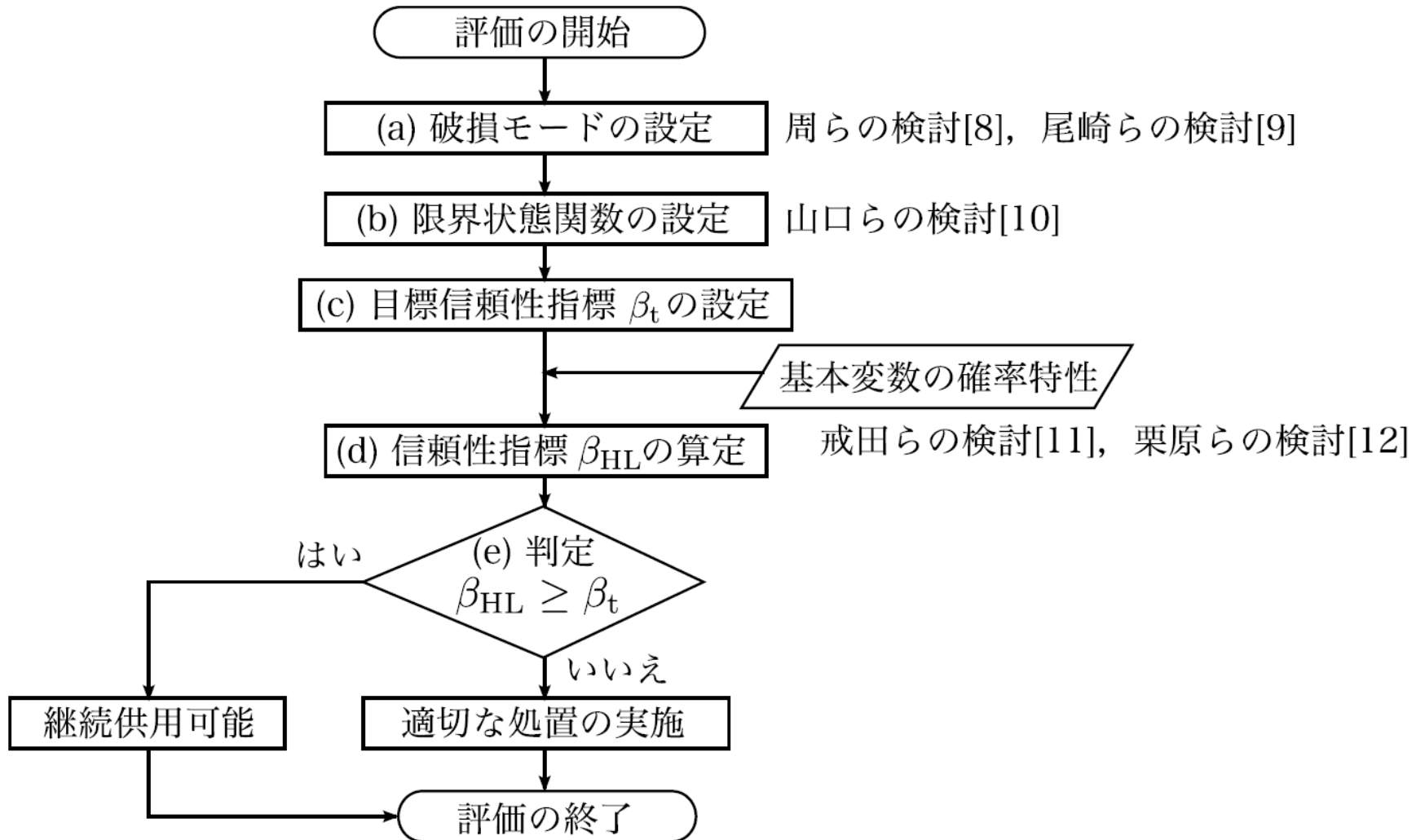
$$MAWP_r = MAWP \quad \text{for } RSF \geq RSF_a$$

$$MAWP_r = \frac{RSF}{RSF_a} MAWP \quad \text{for } RSF < RSF_a$$

$MAWP$: 健全な容器の最高許容使用圧力

RSF_a : 許容残存強度係数(通常0.9をとる)

信頼性に基づく減肉評価フロー



破損モード及び限界状態関数の設定

- 想定する破損モード
 - 内圧による塑性崩壊
- 限界状態関数の設定

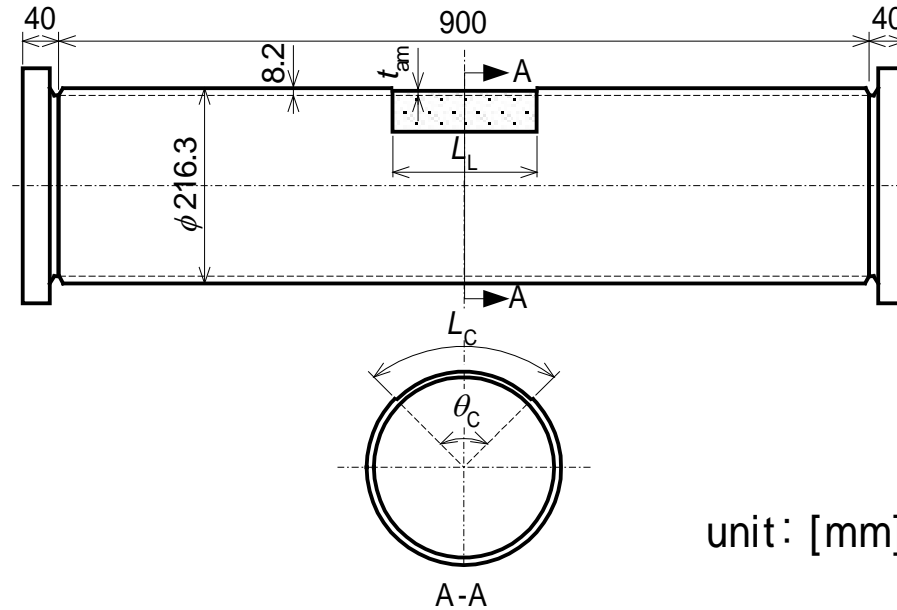
$$g = \frac{RSF \cdot p_{bi}}{\quad} - \frac{p}{\quad}$$

減肉容器の塑性崩壊荷重 運転圧力

限界状態関数とは

基本変数の関数で、 $g=0$ により限界状態を記述する関数。 $g>0$ は望ましい状態で、 $g<0$ は望ましくない状態を示す。

バースト試験条件



Test pipe	長手方向長さ, L_L (mm)	周方向長さ, L_C (mm)	角度, θ_C (°)	平均厚さ, t_{am} (mm)	最小厚さ, t_{mm} (mm)
No.1	28	28	15	4.1	4.1
No.2	85	85	45	4.4	4.2
No.3	170	170	90	4.2	3.9
No.4	255	255	135	3.9	3.4
No.5	255	28.3	15	4.1	3.8
No.6	28.3	255	135	4.0	3.6

バースト試験結果

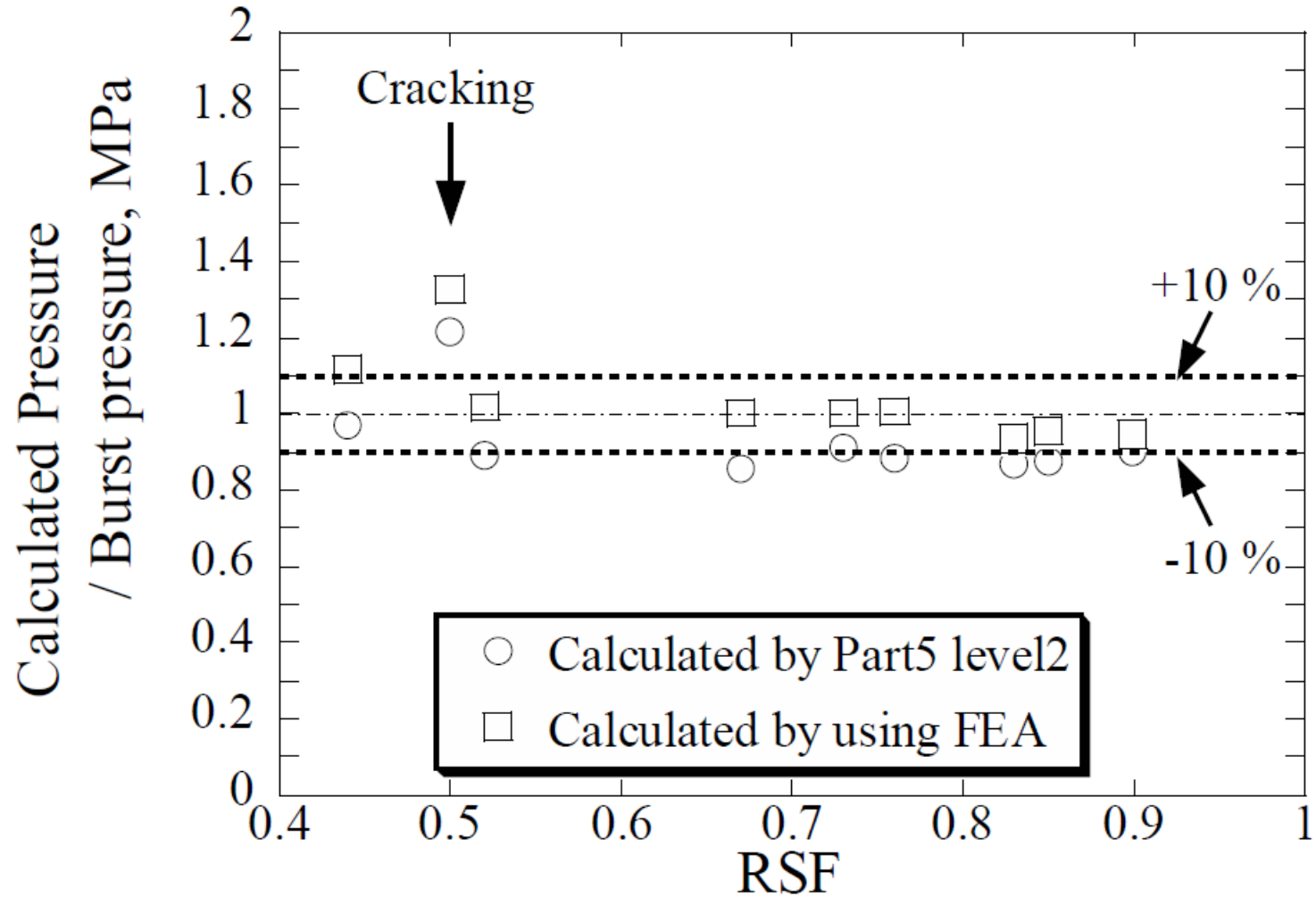
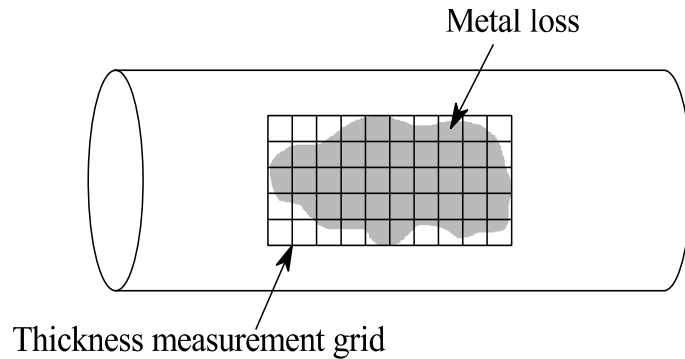


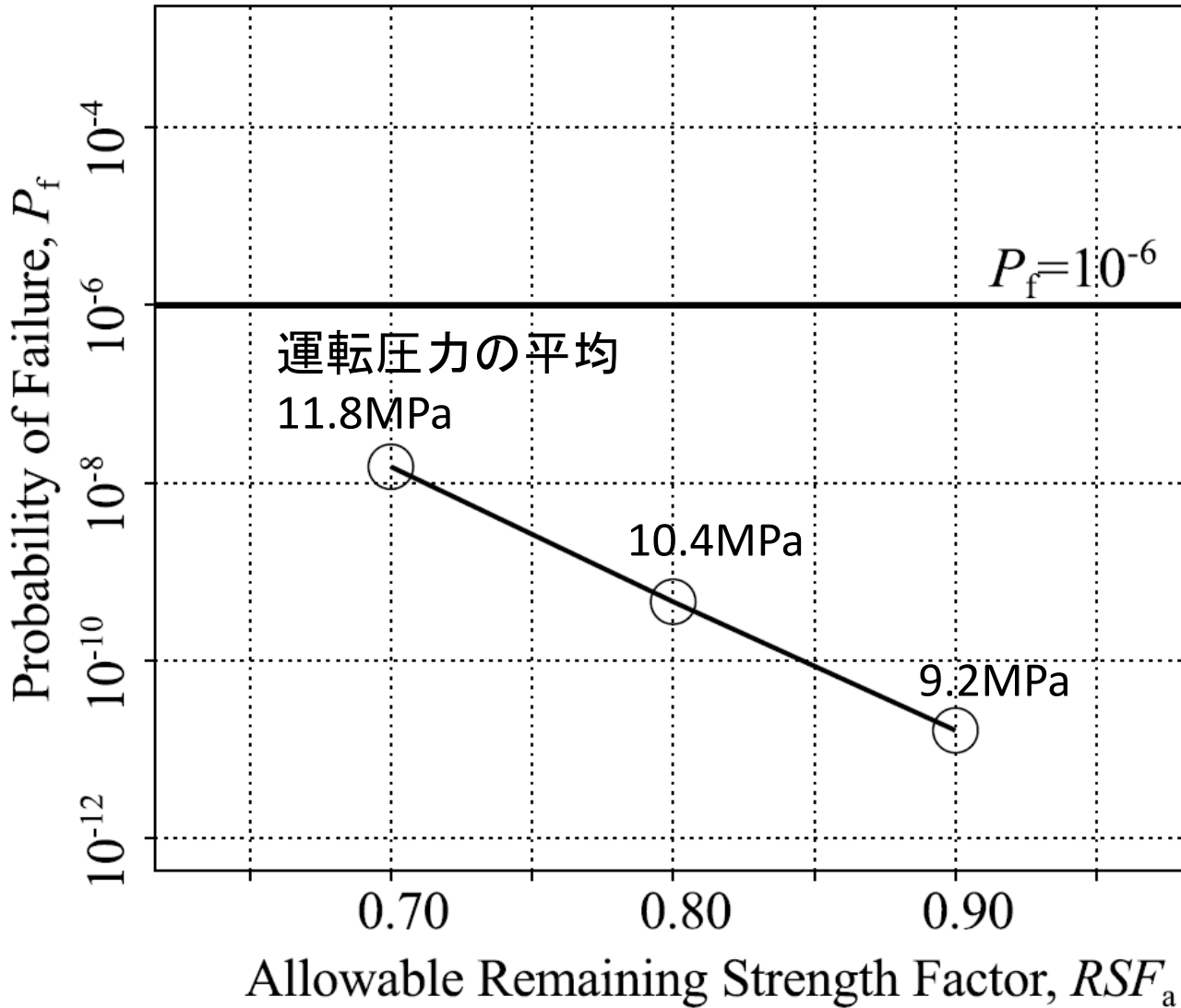
図2 減肉容器の破壊圧力に対する実験値と推定値の比較

実機減肉配管を用いた 厚さ測定値の確率特性調査



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
M1	7.0	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
M2	7.1	7.1	7.1	7.1	6.2	5.0	4.6	7.0	7.0	7.0	7.0
M3	7.0	6.3	4.5	4.8	5.3	4.5	4.7	6.8	6.9	6.9	6.9
M4	6.9	5.8	5.2	5.1	6.2	6.1	5.2	6.5	6.7	6.7	6.8
M5	6.9	6.7	4.6	4.7	5.3	6.6	5.9	6.7	6.7	6.8	6.8
M6	7.0	6.9	6.0	4.0	5.3	6.7	6.9	6.8	6.8	6.9	6.9
M7	6.9	6.8	5.4	4.7	5.6	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9
M8	6.8	6.8	6.5	5.9	6.6	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9
M9	6.9	6.9	6.0	4.5	5.9	5.4	5.9	6.9	6.9	7.0	7.0
M10	6.9	6.9	6.3	5.2	5.7	5.8	5.2	6.9	7.0	7.0	7.1
M11	7.0	7.0	7.1	7.0	7.0	3.2	3.7	7.0	7.1	7.1	7.2
M12	7.1	7.1	7.2	7.1	7.2	4.9	5.0	6.8	7.2	7.2	7.2
M13	7.2	7.2	7.3	7.2	7.2	7.3	7.3	7.2	7.2	7.2	7.3

信頼性評価結果



内容

- 背景
- 規格開発状況
 - RBM
 - JIS
 - 減肉
- 資格認証
- 今後に向けて



背景・趣旨

- 経年劣化の進んだ設備等の効率的な運転と安全管理が大きな問題
- 設備等の効率的な操業を行うためには、信頼性と安全性に加えて、社会性と経済性を包含したリスクベース工学に関する専門知識と経験を持つ技術者が必要。
- これらの技術者の能力は、中立的な第三者機関により公的に認証されることが望まれる。

『設備等の維持管理において、リスクアセスメントを実施し、評価結果をもとに、的確にリスクマネジメントができる実践的な技術者の能力を、中立機関として公正な立場から評価し、**設備等のリスクマネジメントに関する技術者として認証**』

認証制度創設の経緯

経済産業省 中核人材育成事業 H17~H19
「機械構造物のリスクマネジメント能力を持った保全技術者育成プログラムの開発」

(受託) ↓

JRCM産学金連携センター 「リスクマネジメントプログラム委員会」

(再受託) ↓

HPI 認証委員会のもとに「リスクマネジャWG(仮称)」 (H19)
・HPIS F102 認証基準 → **認証制度創設** (H22)
・教育カリキュラム → 教育講習会 (H22-11)
・試験小委員会(H22/1) → 評価試験 (H22-12)

(HPIにおける関連活動)

・HPIS F101 設備診断技術者認証制度 H20/12
・RBM研究専門員会 WG1: HPIS Z106 リスクベースメンテナンス (H22)
(H14~) WG2: HPIS Z107 RBMハンドブック (H22)



H28年度は受験者減で中断
H29スーパー認定事業所制度から引用されたことにより復活

2. 認証取得による利点と効果

①設備等の保有企業；

本認証資格技術者が、リスクベース工学に基づき、技術的に合理的で適切な保守点検を行うことで、保守点検の経費節減とともに、設備の安全運転が可能となる。

②設備等の保全関連企業；

本認証資格技術者を確保して設備保有企業の保守点検業務を支援、実施することにより、顧客の信頼度を高めることができる。

③技術者個人；

本認証資格を得ることにより、リスクマネジメント能力に対する社内外の信頼度を高めることができる。



内容

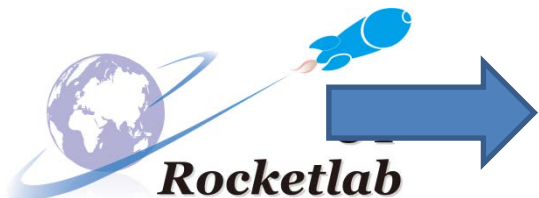
- 背景
- 規格開発状況
 - RBM
 - JIS
 - 減肉
- 資格認証
- 今後に向けて



産業保安規制の現状と課題について

平成27年3月・高圧ガス小委員会資料より

- これまでの四半世紀を5年間毎に見ると、死亡事故は産業保安の大半の分野で減少を見せているが、死傷事故は、四半世紀間、減少していない分野があり(都市ガス・高圧ガス)、また直近10年間で下げ止まっている分野もある(電気・LPガス)
- 国際的にみて我が国の保安水準が相当程度高いと指摘できる分野もある一方、石油コンビナート地区において、近年多数の死傷者を伴う事故が連続して発生している状況でもある
- このような状況を踏まえると、保安水準のより一層の向上が必要である。また、保安規制によって円滑な産業活動が阻害されることのないよう、社会的・国際的な要請を踏まえた規制へと進化させていくことが重要である



産業保安規制のスマート化

目指すべき方向性

技術の進歩や市場・国際的潮流の変化等に迅速かつ柔軟に対応できるような規制への進化, 具体的には

- **Risk-Based-Approach**に基づく重大事故の発生防止を重視する方向へ
- 自主保安の高度化を促すような規制へ(例:保安レベルを向上させている企業にインセンティブを付与する規制)
- 企業の自由な取り組みを可能とするような規制へ
- 規制に係るコスト(事業者側の規制対応コスト, 行政側の規制執行・運用コスト等)を最小化 等

<各論>規制対象の再点検

- 事故発生等のリスクに応じた規制の合理化の観点から、リスクの小さい製品やガス種等については規制対象から除外・緩和すべきではないか。合わせて、裾切りレベルについて再点検すべきではないか。
- 研究開発に取り組む事業者の保安レベルや事故発生等のリスクを勘案しつつ、事業者の技術開発を促す規制の合理化を図るという観点から、研究開発特例等を拡充すべきではないか。



経済産業省大臣官房商務流通保安審議官



特定認定事業者及び自主保安高度化事業者の認定について（内規）

特定認定事業者及び自主保安高度化事業者の認定について（内規）を別紙のとおり制定する。

附 則

この規程は、平成29年4月1日から施行する。

<p>五 連続 運転期 間及び 保安検 査の方 法を適 切に評 価でき る体制 を整備 していること</p>	<p>1 保安 検査体 制</p>	<p>イ 適切に連続運転期間等 を評価できる体制の整備 (1) 容器及び配管等の静 機器の保安体制に関し て ① KHK/PAJ/JPCA S0851(2014)に規定す るFFS組織又はこれと 同等な組織を設置す ること ② 設定した保安検査の 方法及び保安検査期 間の評価者及び承認 者が一般社団法人日 本高圧力技術協会の 設備等リスクマネジ メント技術者資格又 はこれと同等な資格 を有する者がいるこ と (2) 圧縮機及びポンプ等 の動機器の保安体制に 関して ① 運転期間に応じて適</p>	<p>(1)～(4) 次に掲げる体制を満た すこと。 (i) 自主的に保安検査の方法、保安 検査及び連続運転期間等を適切 に設定するための組織を設置し ているとともに、責任者、承認者 及び設定者を選任していること (ii) (i)の責任者、承認者及び設 定者のそれぞれに必要な能力及 び経験等を明確に定め、その内容 が適切であること (iii) 承認者及び設定者につい ては、以下の①から④までの場合 に応じて、それぞれに規定する資格 を有する者であること ① 容器及び配管等の静機器の 保安検査の実施方法を定める 場合は、<u>一般社団法人日本高圧 力技術協会の設備等リスクマ ネジメント技術者資格</u>又はこ れと同等な資格を有する者で あること ② 圧縮機及びポンプ等の動機 器の保安検査の実施方法を定 める場合は、機械保全技能士、</p>
--	---------------------------	--	--