

高圧ガス事故の統計と解析

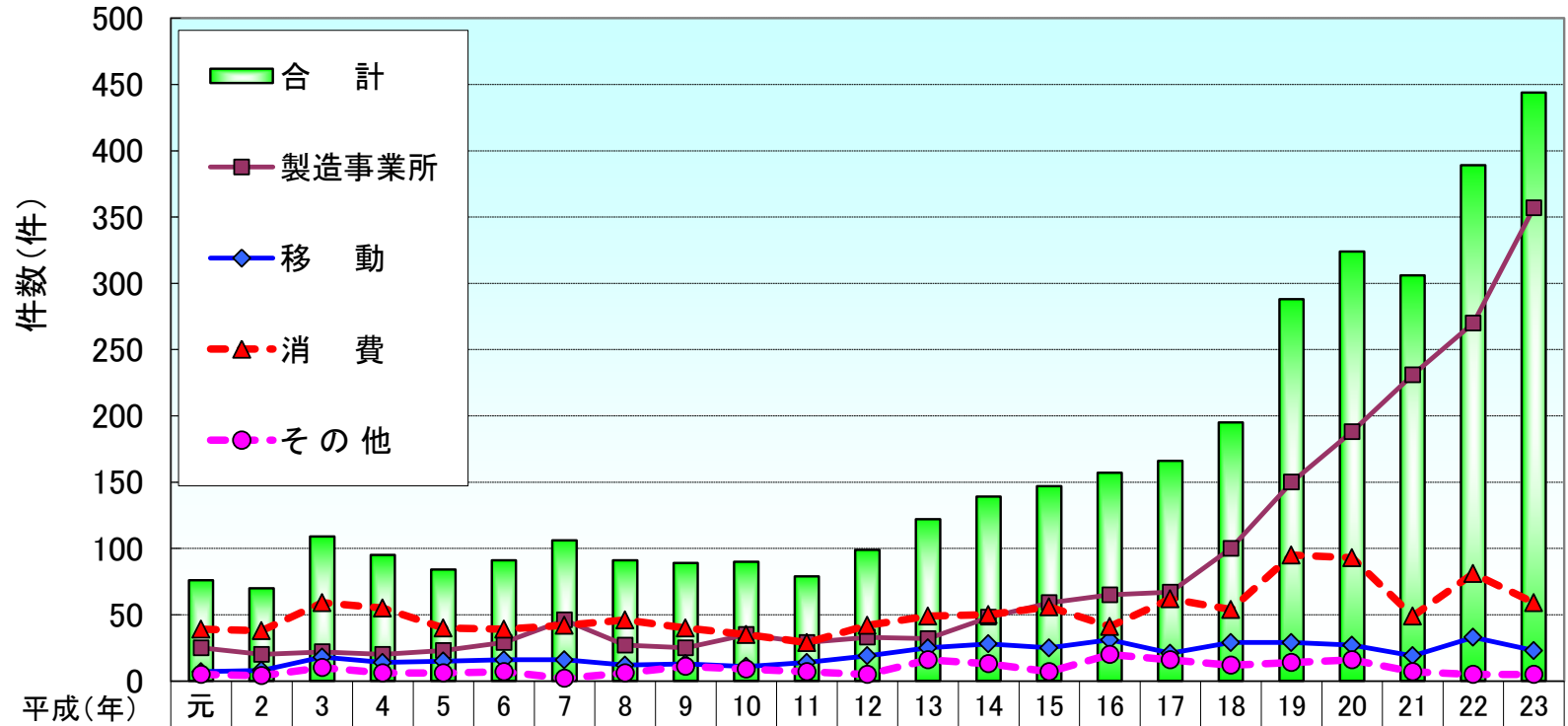
小林 英男
(東京工業大学 名誉教授)

この資料は、(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 FQA小委員会 における講演資料を掲載したものです。この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 FQA小委員会 ナレッジプラットフォーム公開資料(2015年):「高圧ガス事故の統計と解析」東京工業大学名誉教授 小林英男

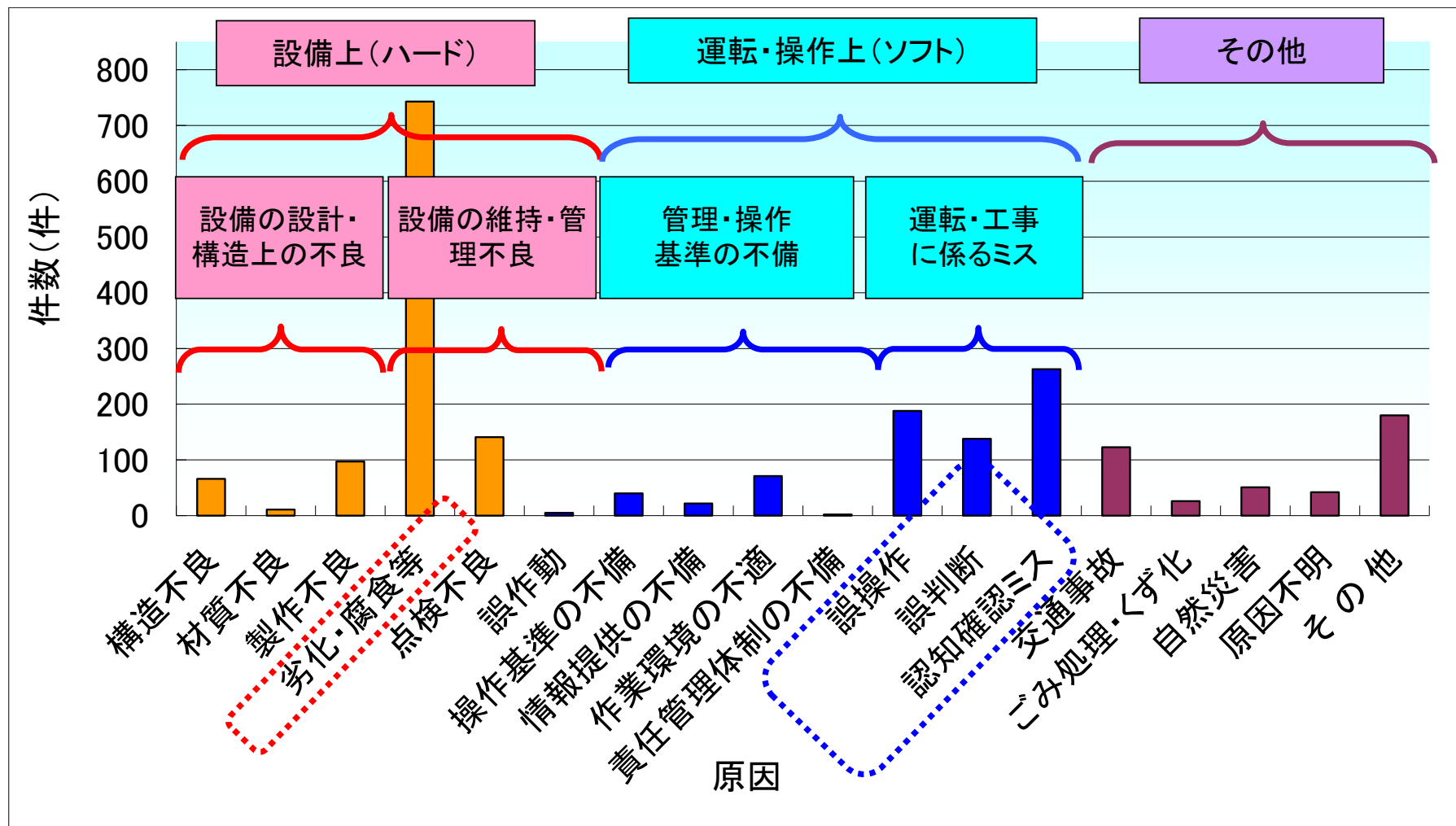
- 高圧ガス事故の届け出制度
→ 網羅的な統計情報
- 高圧ガス事故の統計と解析
- 製造事業所の疲労事故
- 熱応力による疲労と振動による疲労
- 銅管とフレキシブル管の疲労
- 疲労モニタリング

平成元年以降における高圧ガス事故件数の推移(災害)



平成(年)	元	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
■ 合 計	76	70	109	95	84	91	106	91	89	90	79	99	122	139	147	157	166	195	288	324	306	389	444
■ 製造事業所	25	20	22	20	23	29	46	27	25	35	29	33	32	48	59	65	67	100	150	188	231	270	357
◆ 移 動	7	8	18	14	15	16	16	12	13	11	14	19	25	28	25	31	21	29	29	27	19	33	23
▲ 消 費	39	38	59	55	40	39	42	46	40	35	29	42	49	50	56	41	62	54	95	93	49	81	59
● そ の 他	5	4	10	6	6	7	2	6	11	9	7	5	16	13	7	20	16	12	14	16	7	5	5

平成13～平成22年における原因別の事故件数(災害)



- 平成18年から事故件数は急増
- 平成23年の事故件数は平成18年の事故件数の2倍
- 原因として設備の劣化・腐食等が突出
- 劣化・腐食等は設備の高経年化の結果
- 設備は老朽化しており、事故は増加し続けるという予測

□ 定義

高圧ガス保安法の適用を受ける高圧ガスの製造等の取扱い中に発生した事故

□ 分類

- ①爆発、②火災、
- ③噴出・漏えい(以下「漏えい」という)、
- ④破裂・破損、⑤喪失・盗難、
- ⑥高圧ガス製造等の設備が危険になった状態、
- ⑦その他

□漏えい①

機器、配管などの本体（溶接部を含む）の損傷、破壊（疲労、腐食など）による漏えい

□漏えい②

フランジなどの締結部、バルブなどの開閉部と取付部、可動シール部からの比較的微小な漏えい（パッキンなどの劣化を含む）

□漏えい③

漏えい①と漏えい②以外のバルブの誤開閉、開閉忘れ、液封、外部衝撃などによる破裂、破損、変形、その他の比較的大規模な漏えい

＜設備に関連する分類(ハード)＞

- ①設計不良
- ②製作不良(主に工場で発生)
- ③施工管理不良(主に現地で発生)
- ④腐食管理不良
- ⑤検査管理不良
- ⑥点検不良(移動と消費に限定)
- ⑦締結管理不良
- ⑧シール管理不良
- ⑨容器管理不良(移動容器に限定)

< 運転と操作に関連する分類(ソフト) >

- ⑩ 組織運営不良
- ⑪ 操作基準等の不備
- ⑫ 情報提供の不備
- ⑬ 誤操作、誤判断、認知確認ミス
- ⑭ 不良行為

< その他 >

- ⑮ 自然災害
- ⑯ 交通事故
- ⑰ その他

□分野の分類

製造事業所、移動、消費

□製造事業所の分類

- ・一般高圧ガス保安規則適用(一般)
- ・冷凍保安規則適用(冷凍)
- ・コンビナート等保安規則適用(コンビ)
- ・液化石油ガス保安規則適用(LP)

- 改正マニュアルは平成23年1月から施行
- 改正マニュアルによる最初の結果が平成23年分
- 平成20年から平成22年までの3年分を対象とし、改正マニュアルを適用して結果を再検討
- 平成20年から平成23年までの最近の4年間の統計
- 平成23年の結果は、東日本大震災の結果を含む(約20%)

(平成20～23年の合計)

分野	事故 件数	漏えい					爆発、 火災	破裂、 破損	その他、不 明	漏えい →爆発など
		漏えい①	漏えい②	漏えい③	不明					
製造事業所	1046	979	529	236	206	8	12	48	7	48
一般	402	373	232	73	60	8	0	29	0	20
冷凍	406	399	200	111	88	0	2	0	5	0
コンビ	140	131	75	32	24	0	7	1	1	22
LP	98	76	22	20	34	0	3	18	1	6
移動	102	87	17	8	61	1	5	0	10	11
消費	282	225	43	45	137	0	42	2	13	147
その他	33	29	5	10	14	0	3	1	0	8
合計	1463	1320	594	299	418	9	62	51	30	214
(%)	(100)	(91)	(41)	(20)	(29)	(1)	(4)	(3)	(2)	(15)

- 漏えい事象が事故件数の91%を占める。
製造事業所＞移動＞消費
- 漏えいなしの爆発事象などが事故件数に占める比率は低い(7%)。
- 漏えいが先行する爆発事象などが事故件数の15%を占める。
消費＞移動＞製造事業所

- 漏えい事象(91%)の内訳は、漏えい①(41%)、漏えい②(20%)、漏えい③(29%)である。
- 製造事業所の漏えい事象(100%)は、漏えい①が大半を占め(54%)、漏えい②と漏えい③がこれに次ぐ(24%と 21%)。
- 移動の漏えい事象(100%)は、漏えい③が大半を占め(70%)、漏えい①がこれに次ぎ(20%)、漏えい②は少ない(9%)。
- 消費の漏えい事象(100%)は、漏えい③が大半を占め(61%)、漏えい②と漏えい①がこれに次ぐ(20%と19%)。

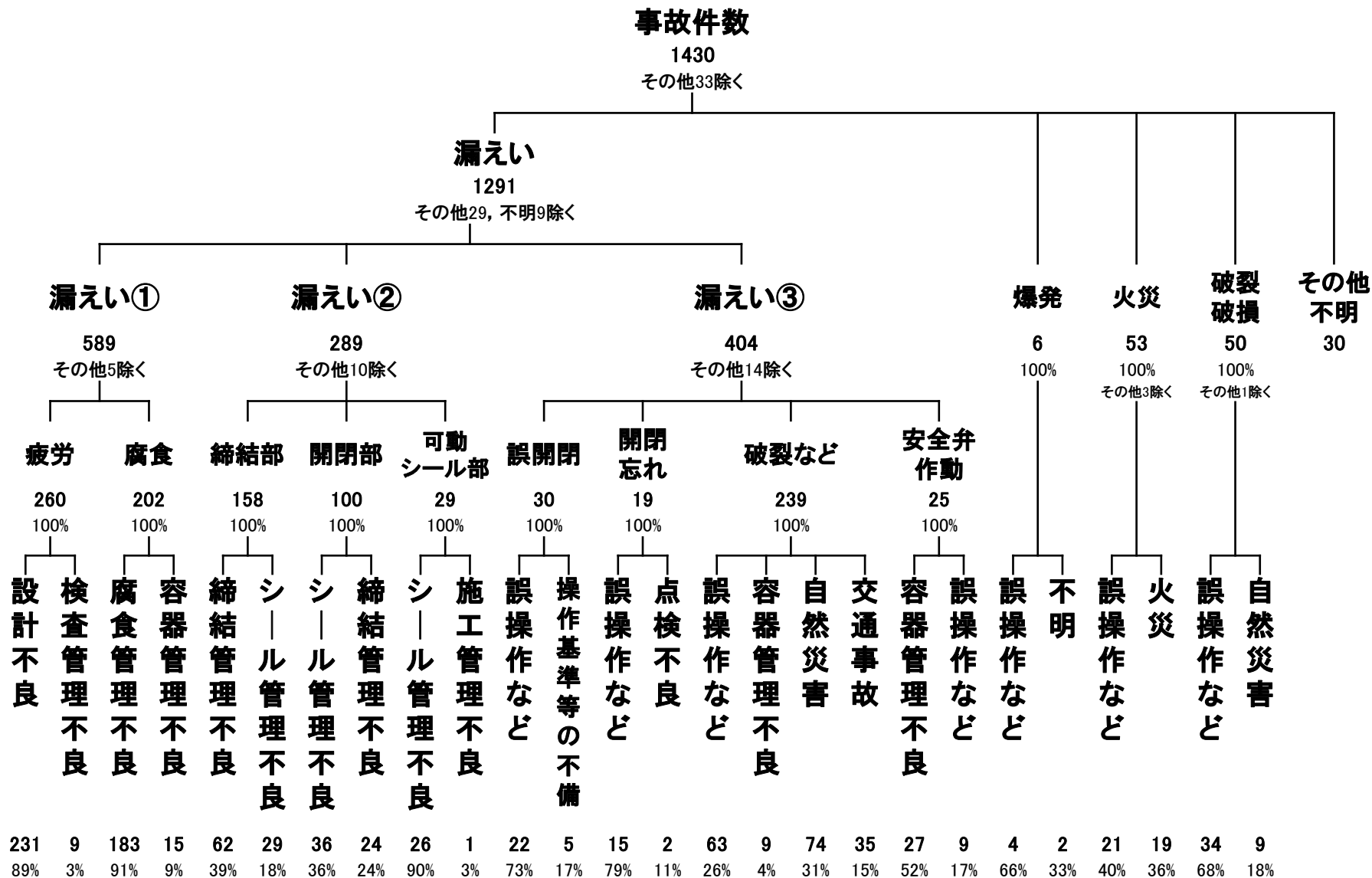
(平成20～23年の合計)

分野	漏えい① 件数	損傷メカニズム					
		疲労	腐食	摩耗	SCC	E/C	その他
製造事業所	529	246	178	27	12	3	63
一般	232	152	33	6	4	0	37
冷凍	200	67	94	19	3	1	16
コンビ	75	19	44	0	5	2	5
LP	22	8	7	2	0	0	5
移動	17	13	3	0	0	0	1
消費	43	1	21	13	2	0	6
その他	5	0	5	0	0	0	0
合計	594	260	207	40	14	3	70
(%)	(100)	(44)	(35)	(7)	(2)	(1)	(11)

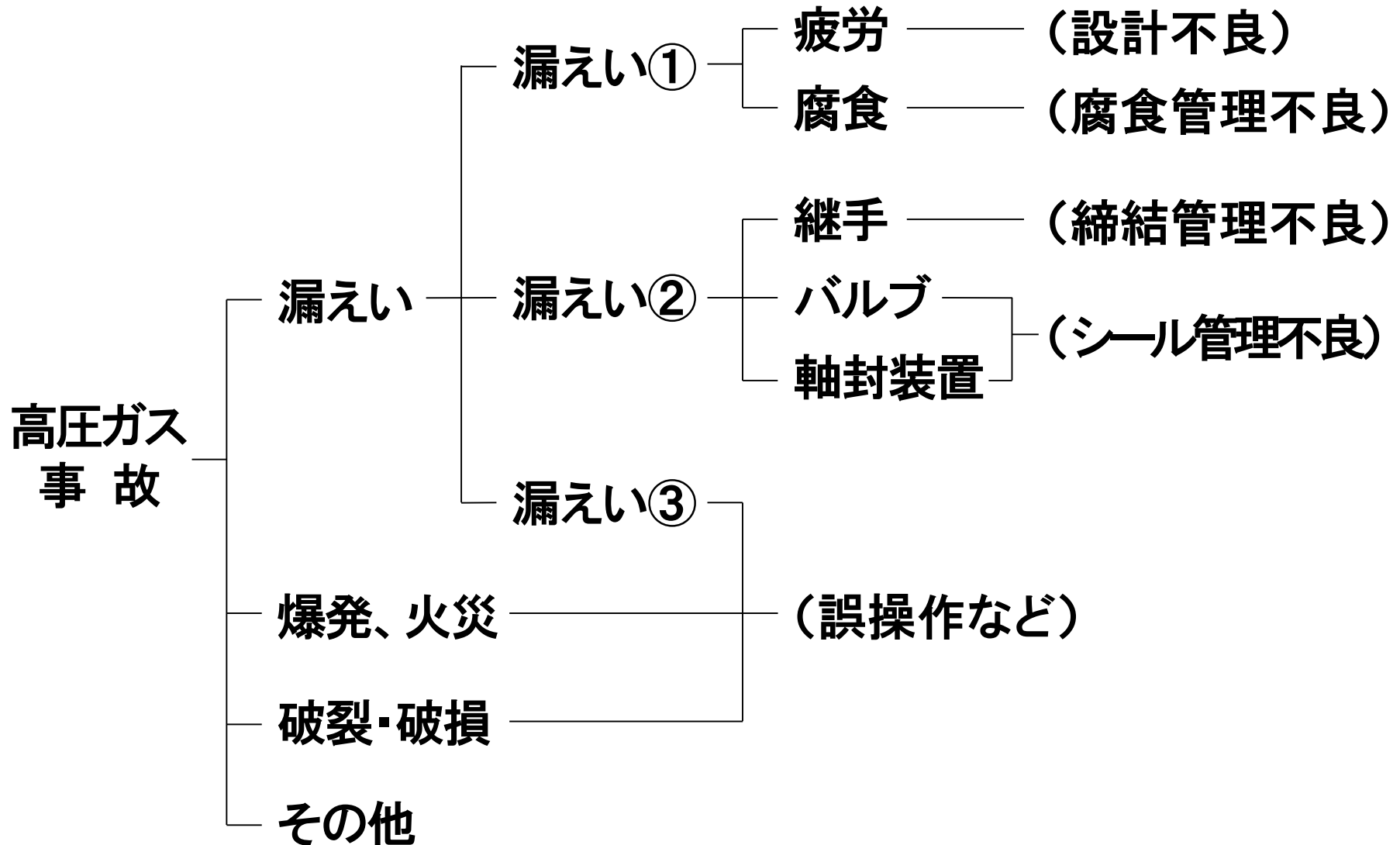
細分化の統計(漏えい①を100%とした比率)

- 漏えい①の損傷メカニズムは、疲労と腐食が大半を占める(44%と35%)。
- 疲労の比率は、特に製造事業所(一般)と移動で高い。
- 腐食の比率は、製造事業所(冷凍、コンビ)と消費で高く、疲労の比率を上廻る。
- 摩耗が意外に多く(7%)、特に製造事業所と消費に集中している。
- 応力腐食割れ(SCC)とエロージョン/コロージョン(E/C)は少ない(2%と1%)。

原因の統計と解析



- 漏えい①の疲労は、設計不良(89%)
- 漏えい①の腐食は、腐食管理不良(91%)
- 漏えい②は、締結管理不良とシール管理不良
- 漏えい③は、誤操作など
- 漏えいなしの爆発などは、誤操作など



(平成20年から平成23年までの4年間の統計)

製造事業所	件数	(%)
一般高圧ガス保安規則適用	152	(62)
冷凍保安規則適用	67	(27)
コンビナート等保安規則適用	19	(8)
液化石油ガス保安規則適用	8	(3)
合計	246	(100)

□ 機器

CE、蒸発器、CNGスタンド、圧縮機、配管

□ 流体

LNG、CNG、液化ガス(O₂、N₂、Ar、CO₂)、Air

□ 応力変動の要因

温度変動(熱応力)(85/152)、振動(51/152)

□ 部位

配管ろう付部(47/152)、溶接部 (70/152)、
フレキシブル管(9/152)

□ 原因

設計不良(150/152)、施工管理不良

□ 機器

冷凍設備、空調設備、圧縮機、配管

□ 流体

フルオロカーボン、アンモニア(なし)

□ 応力変動の要因

振動(57/67)、圧力変動(2/67)

□ 部位

- ・銅管(ろう付部を含む)、配管
- ・フレア式管継手、フレキシブル管、その他

□ 原因

設計不良(52/67)、施工管理不良

- **機器**
配管、フレキシブル管、ベローズ
- **流体**
水素、酸素、液化窒素
- **応力変動の要因**
 - ・ 温度変動(10/19)
 - ・ 振動(6/19)
- **部位**
配管母材、溶接部、ろう付部
- **原因**
検査管理不良(7/19)、製作不良(7/19)

- 機器
充てん設備、配管
- 流体
LPG
- 応力変動の要因
振動(4/8)
- 部位
配管母材、溶接部、フレキシブル管
- 原因
検査管理不良(4/8)、設計不良(3/8)

□ 応力変動の要因

- ・ 温度変動(熱応力)
- ・ 振動

□ 部位

- ・ 銅管(ろう付部を含む)
- ・ 配管溶接部
- ・ フレキシブル管

□ 原因

設計不良、施工管理不良、検査管理不良
(設備の高経年化による劣化ではない)

□内圧による応力の繰返し

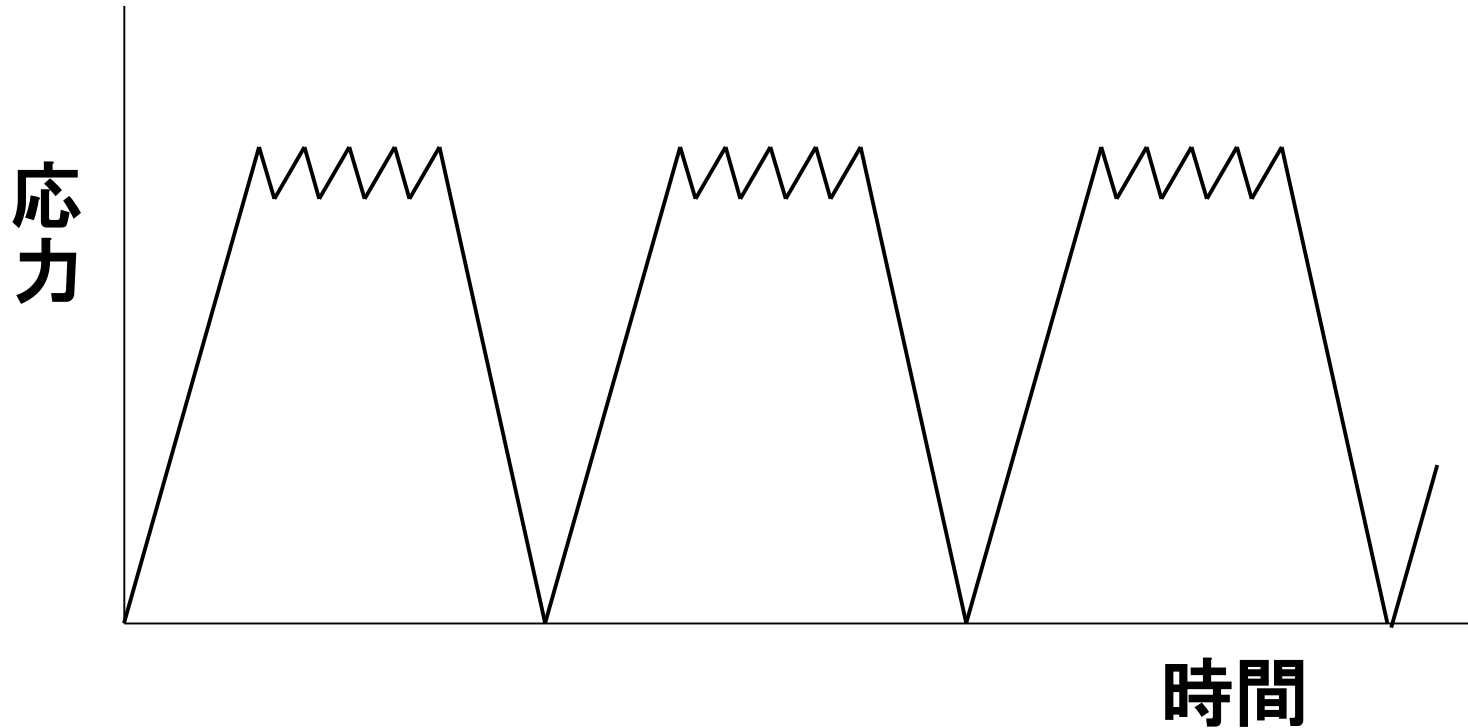
- 圧力容器の起動停止サイクル

□熱応力の繰返し

- 加熱冷却の温度サイクル
- 流体温度の変動

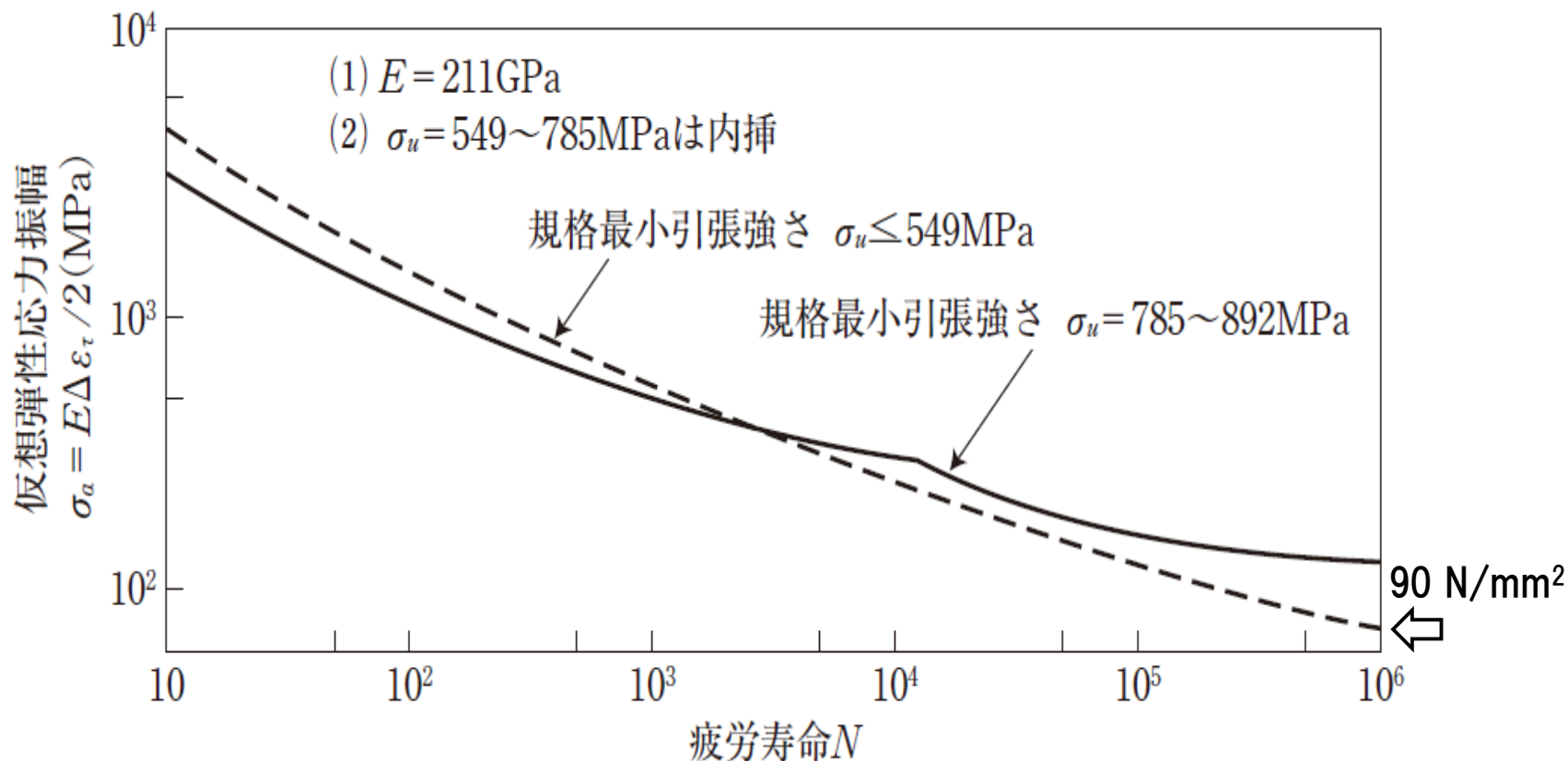
□振動による応力の繰返し

- 圧縮機の振動
- 流体振動



起動停止サイクル(平均応力)に重畳する熱サイクル(応力振幅)

- 内圧による応力 < 許容応力
- 許容応力 = 引張強さ / 4 = $550 / 4 = 137 \text{ N/mm}^2$
- 最大応力 137 N/mm^2 → 応力振幅 69 N/mm^2
- 引張強さ 550 N/mm^2 → 疲労限度 90 N/mm^2
- 応力振幅 69 N/mm^2 < 疲労限度 90 N/mm^2
(内圧の繰返しにより疲労は起きない。)



ASMEとJISの圧力容器規格,
温度371°C以下の炭素鋼、低合金鋼の例

- 熱応力(熱膨張と熱収縮の拘束による応力)

$$\sigma_T = E \alpha \Delta T = 220 \text{ N/mm}^2$$

鋼の縦弾性係数 $E = 201 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$

鋼の線膨張係数 $\alpha = 11 \times 10^{-6}$

温度差 $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

- 熱応力の応力振幅 110 N/mm^2
> 疲労限度 90 N/mm^2
(熱応力の繰返しにより疲労は起きる。)

- 熱応力は断面積を大きくしても、軽減できない。

- 共振を回避しても、振動する。
- 振動応力の繰返しにより、疲労する。
- 応力振幅は小さいので、疲労寿命は長い。
- 加振振動数が大きいので、短時間で疲労する。
- カルマン渦による流体振動の例
 $100 \text{ Hz} \times 1 \text{ 日} \rightarrow 10^7 \text{ 回}$

自由の鐘の割れ

□ アメリカの国宝

□ 鐘は共振で疲労し、割れる。

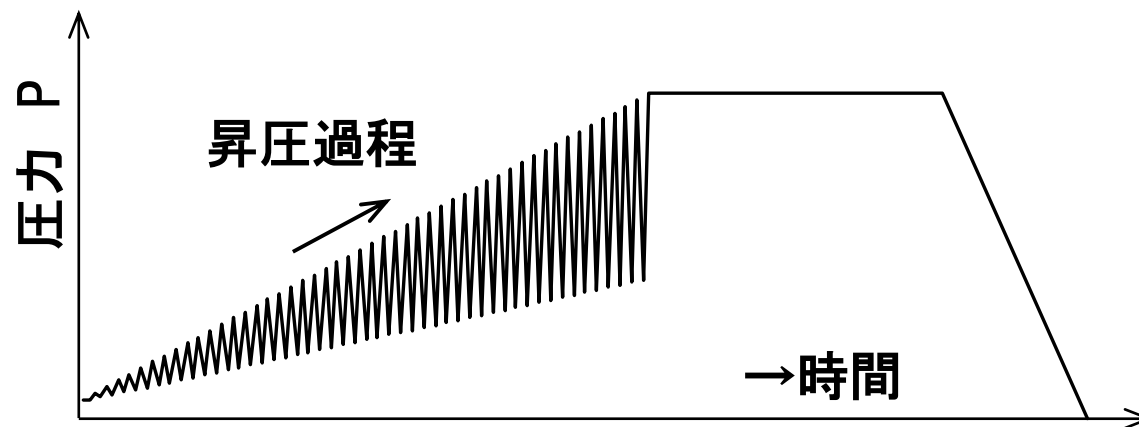
□ 疲労き裂は開口しない
(き裂閉口)

□ 自由の鐘の割れは
大きく開口

□ 鑄造後の冷却による
インターナルストレス



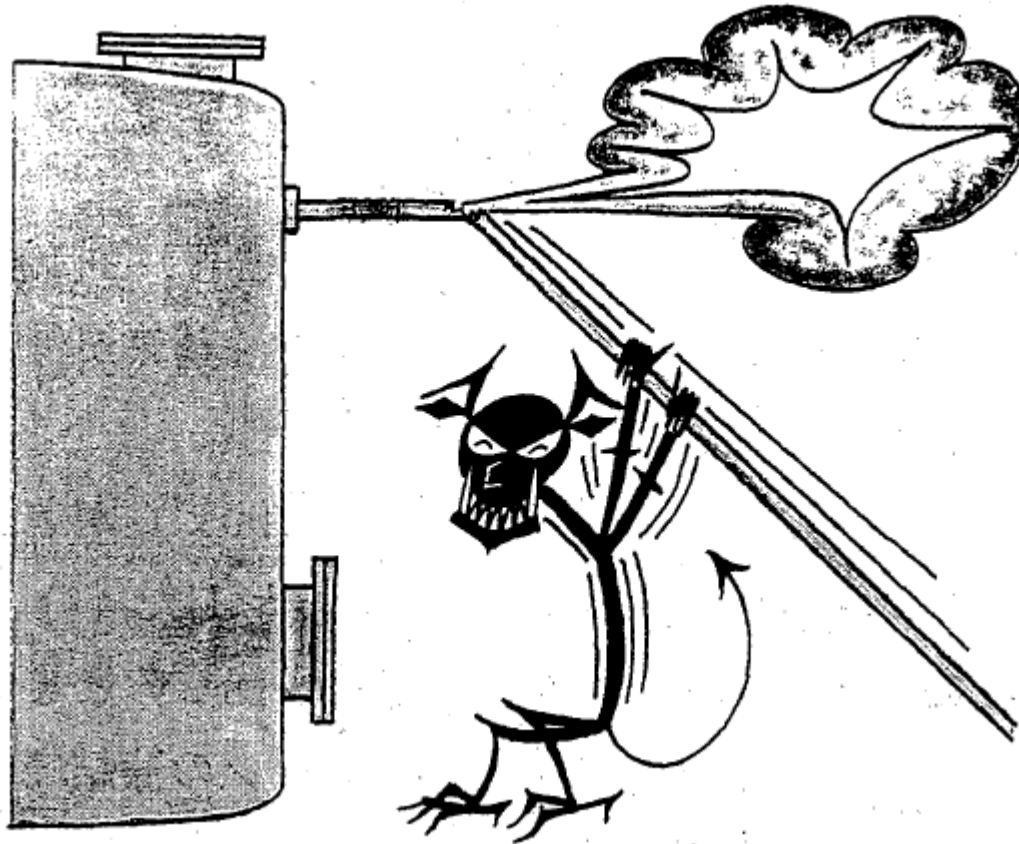
- 圧縮機の脈動がない場合
昇圧と降圧が1サイクル
- 圧縮機の脈動がある場合
昇圧過程の脈動が数100サイクル
最大圧力と最小圧力が漸増
(応力振幅と平均応力が漸増)



圧縮機の脈動がある場合の例

- 機器に取り付けた小口径配管（細管）
- 振動源は機器の振動、流体の脈動
- 口径の減少、管長の増大
→ 固有振動数の低下
- ねじ込み接続×、溶接○
- サポートなし×、バルブなどの重量物あり×

小口径管は折れる



- CE、冷凍空調設備
- アンモニア（鋼管）→フルオロカーボン（銅管）
- 熱伝導性、加工性、耐食性
- JIS H3300 C1220T-OL
- JIS B 8265の許容引張応力41MPa
- 低強度（耐力70MPa）
- 低剛性（縦弾性係数117GPa）

□ 熱変形大

[線膨張係数 $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (銅) $> 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (鋼)]

□ 固有振動数と曲げ剛性小

[縦弾性係数 117 GPa (銅) $< 201 \text{ GPa}$ (鋼)]

□ 温度変動(熱応力)と振動による疲労

□ 銅管ろう付け部の両振り曲げ疲労 (10^7 回疲労強度 50 MPa)

- 27件の内訳は、冷凍19件、一般6件、LP2件
- 配管同士の接触によるフレットニング摩耗
- 配管レイアウトの不適切
- 本質的な原因は配管の振動(疲労と同じ)

- 平成23年の高圧ガス事故件数(444)のうち、東日本大震災における事故件数(86)が20%を占める。
- 上記の86件のうち、製造事業所(冷凍)の地震による件数(51)が大半を占める。
- 上記の51件の地域分布は、栃木県の件数(44)が大半を占める。
- 配管の破断、損傷によるフルオロカーボンの漏えいがすべて

- 金属管（フレキシブルホースではない）
- オーステナイト系ステンレス鋼の加工成形（スパイラルチューブ）
- 変位吸収が本来の機能
- 振動がある場合には、
防振用フレキシブル管の選定が必要
- 疲労の加速要因
（加工硬化、残留応力、割れ、端部とフランジの溶接）

フレキシブル管のカタログ

ステンレスホース

レギュラー
フレックス

変位

防振

高圧

屈曲

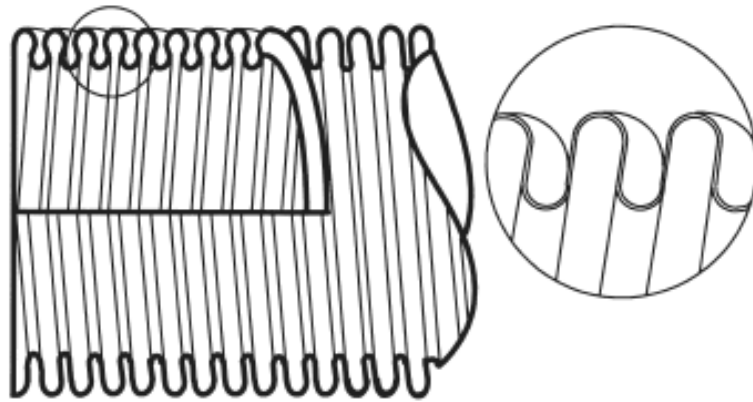
柔軟

内圧
変化

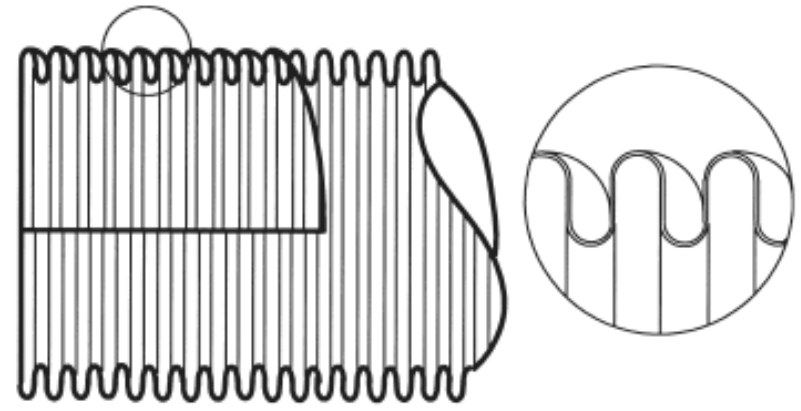
最適
適応可能
不適応

●材質 SUS304、SUS316L

高速連続成型機で成型し安定した性能を持つ汎用チューブです。
8A～65Aはスパイラルタイプ、80A～150Aはワンピッチタイプが標準になります。



スパイラルタイプ



ワンピッチタイプ

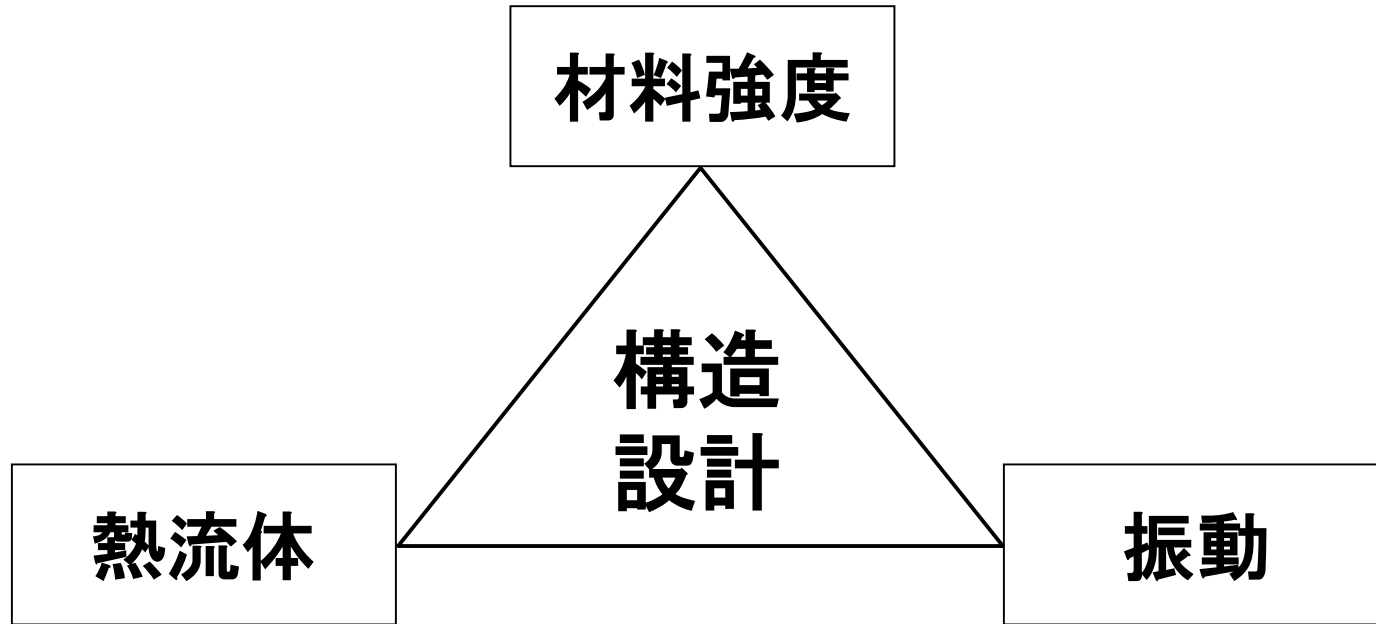
□疲労は必ず起きる。

□疲労の原因は設計不良

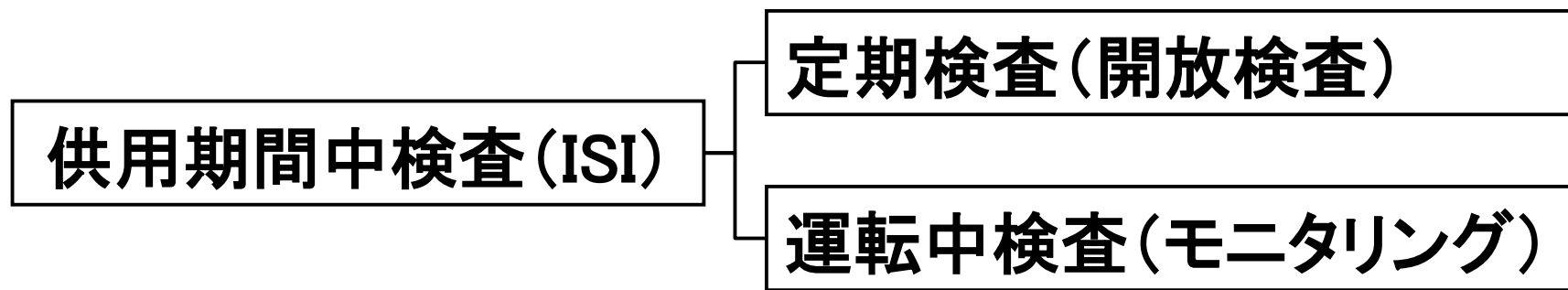
□設計不良の具体的内容

- 熱応力の繰返しによる疲労の考慮なし
- 振動による疲労の対策不十分

- 熱応力 (応力振幅)
- 振動応力 (応力振幅)
- 残留応力 (平均応力)



情報伝達不十分
相互認識不十分



- 運転中検査, オンラインISI,
状態基準保全, 構造ヘルスマニタリング
- 原則として両者が必要
- 機器と事象による有効性の評価
- 両者の組合せによる検査の合理化

- 構造ヘルスマモニタリングの具体例
- 供用期間中の機器・配管の振動計測，
温度計測，水質計測など
- 計測結果に基づく疲労設計の再評価と
余寿命予測
- 余寿命予測に必要な疲労のデータ

- 小林英男編著、
高圧ガス事故の統計と解析、
事故知識の伝承と活用、
高圧ガス保安協会、(2014)
- 特集号、高圧ガス事故の統計と解析、
(平成25年までの6年間の結果)、
高圧ガス、Vol.51, No.11, (2014)