

# 実構造問題の解析事例紹介と リスクベースエンジニアリングについて

- I 学生研究における実構造問題の研究紹介
- II 機械構造物の实用解析事例の紹介
- III リスクベースエンジニアリングについて

前 岡山県立大学情報工学部  
早川 悌二



# I 学生研究における実構造問題の研究紹介

## 強度設計システム学研究室

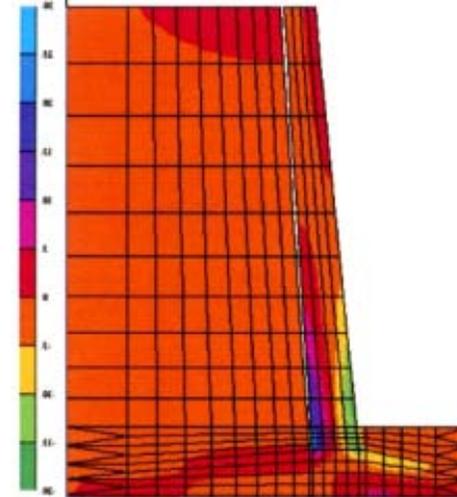
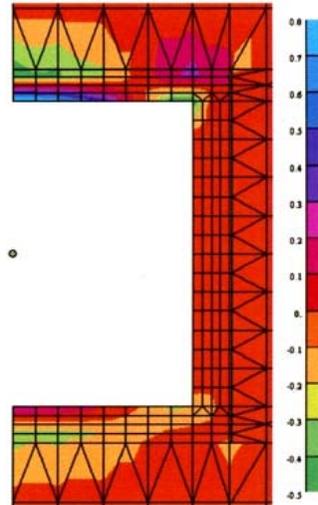
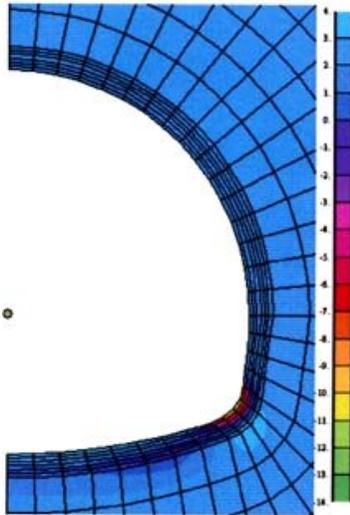
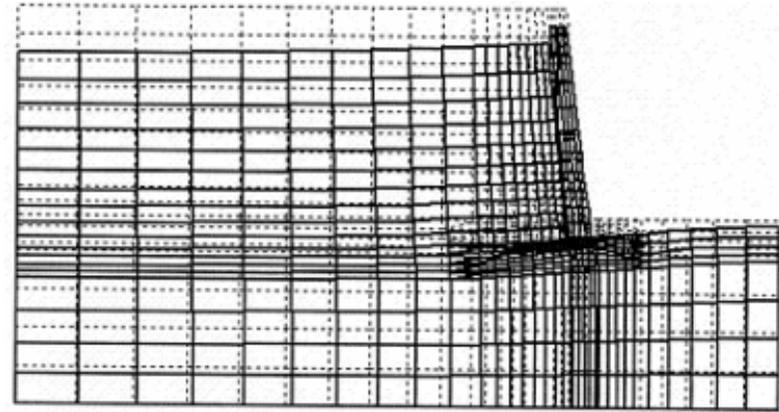
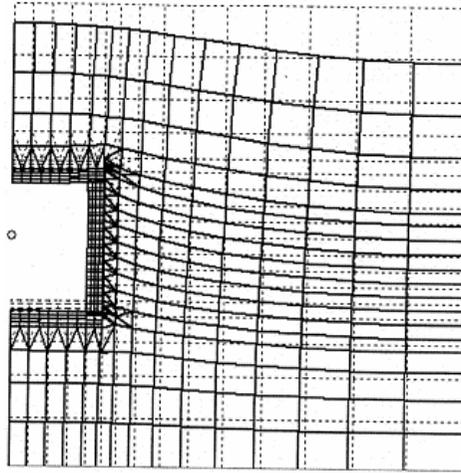
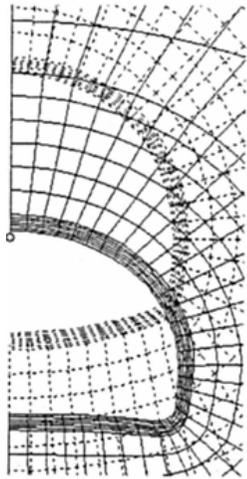
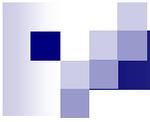
- ・工学とは「もの」を通じて社会に役立つ／問題を解決する学問であるとの認識から、構造物の“ものづくり”に役立つ研究を実施
- ・研究においては、①理論 ②コンピュータ解析 ③実験が不可欠

## (1) コンクリート製道路構造物の力学的特性

- ・各種パラメータに対する応力・変形特性
- ・コンクリート構造設計指針との比較検討

対象構造	①山岳トンネル			②カルバート	③擁壁
断面形状	円形	馬蹄形	アーチ	ボックス形	逆T形
荷重	地山、自重			土、自重 トレーラ	土、自重 自動車
土-コンクリ境界	吹き付けコンクリ：一体			すべり効果	すべり効果
パラメータ	断面形状、土被り高さ、地質(砂礫、砂質土)				
解析法	平面ひずみ弾性解析				

情報／資料入手：岡山大学環境デザイン工学科  
土木学会

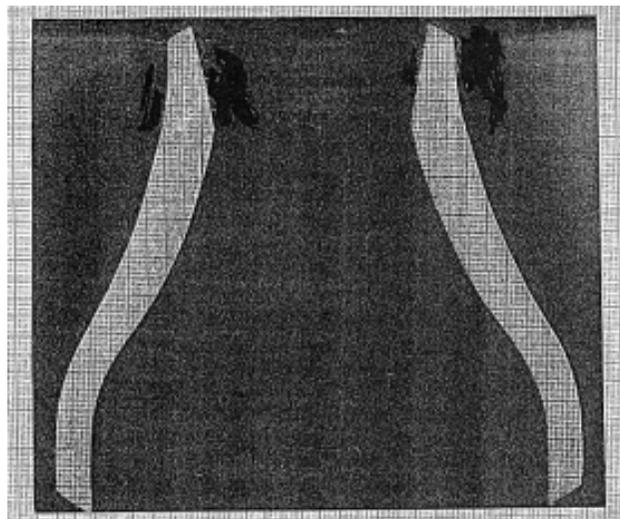


馬蹄形トンネル、カルバート、擁壁の変形と長さ方向応力

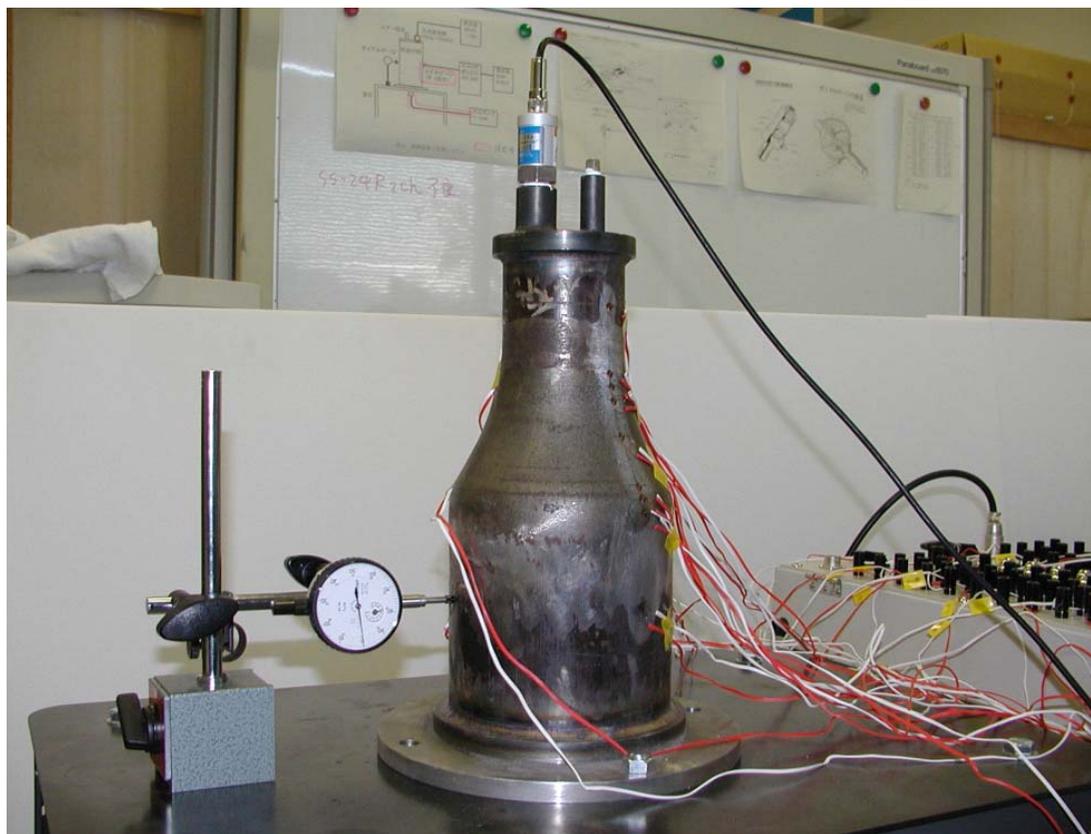
## (2) 配管用レジューサの応力と強度

偏肉を有する実形状レジューサが内圧と非定常熱荷重を受ける場合の変形・応力・強度の特性

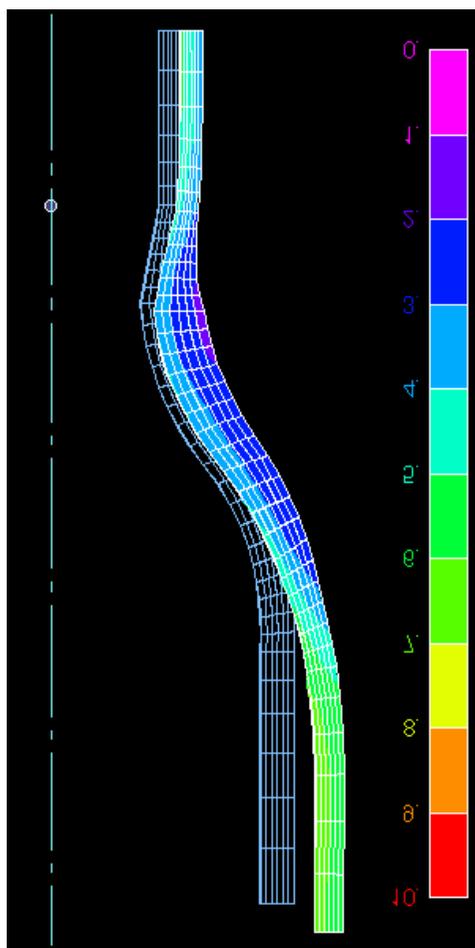
対象構造	材質	配管用炭素鋼 PS-410
	形状寸法	JIS 125A × 65A × sch80 JIS 125A × 65A × sch40
荷重	内圧、非定常熱荷重	
解析法	3次元ソリッド要素による弾性解析、非定常熱伝導解析	
実験	実機モデルのひずみ、変位計測	
強度評価	ASME B&PV CODE SECT, VIII, DIV. 2	



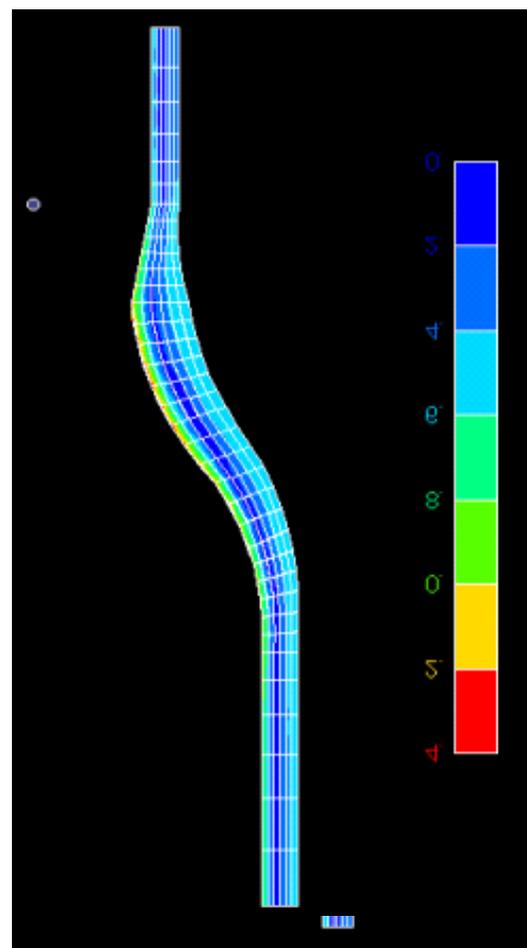
断面形状 (Sch80)



実験装置



変形とMises応力  
(内圧100kgf/mm<sup>2</sup>)



Mises応力  
(非定常熱荷重)

### (3) 配管フランジ構造部の力学的特性と漏れ特性

広く実用されている配管フランジについて、  
種々の使用条件に対する力学的特性と漏れ特性

対象構造	材質	フランジ:S25C ボルト:S35C
	形状寸法	JIS WN-30K-50A(sch40)
ガスケット	渦巻き形	
	金属平形	軟質Cu, 軟質Al, 極軟鋼SPCC
荷重	ボルト締付け荷重、内圧、曲げ荷重、熱荷重	
解析法	3次元ソリッド要素による弾性解析 ガスケット: 材料非線形 ガスケット当たり面: 接触要素	
実験	ガスケット	圧縮負荷・除荷試験、クリープ試験、硬さ試験 面圧分布計測(プリスケール)
	実機モデル	ひずみ、変位計測 漏れ圧力(リークセンサー)

材料試験 : 岡山県工業技術センター / 金属材料研究室

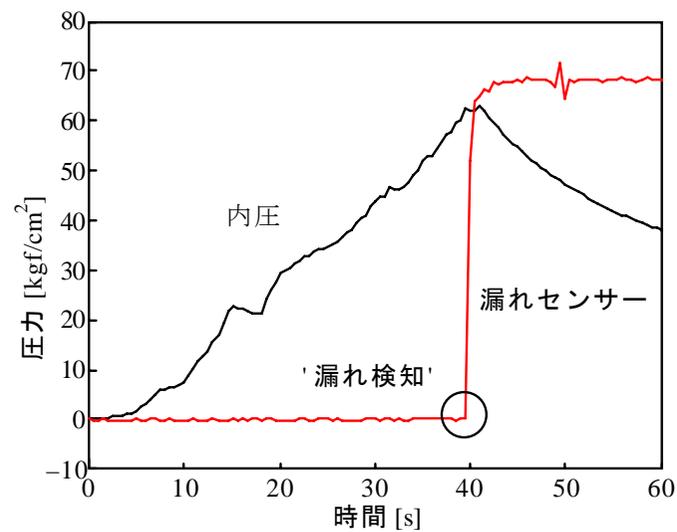
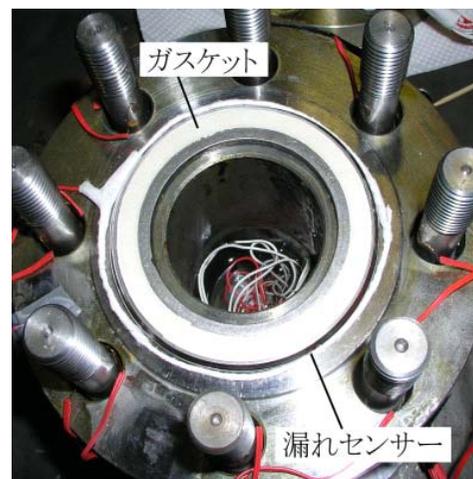
CASE A

内圧

渦巻き形ガスケット

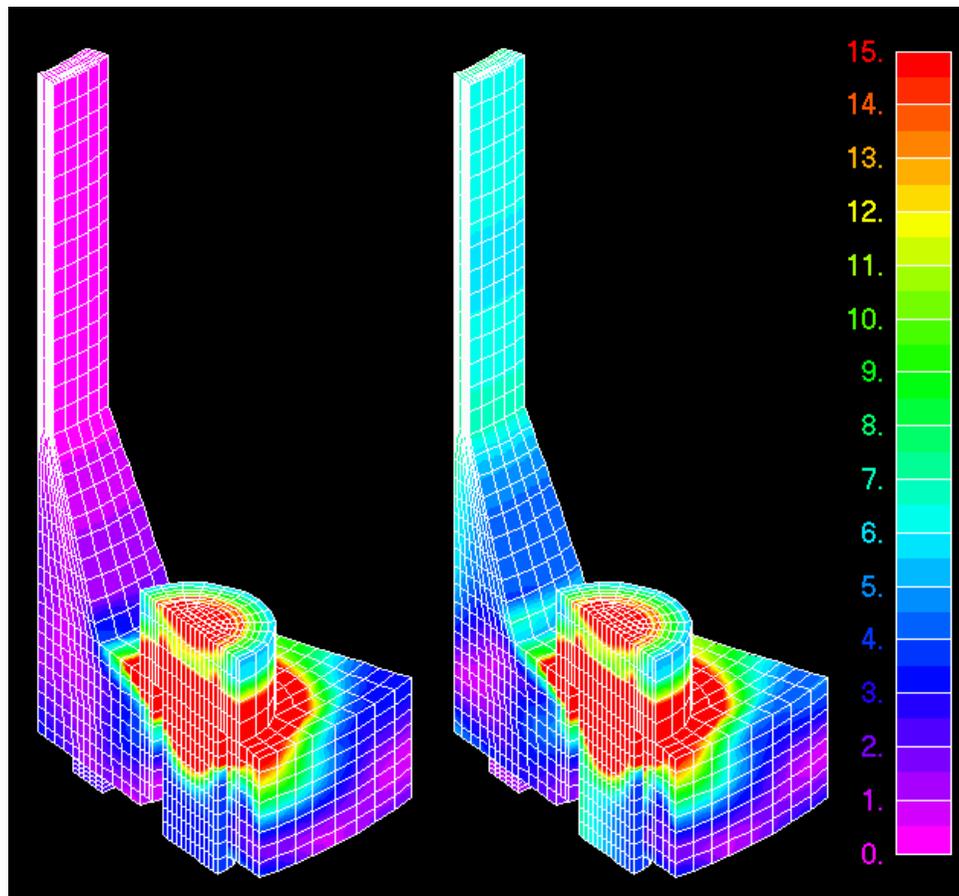


実験装置

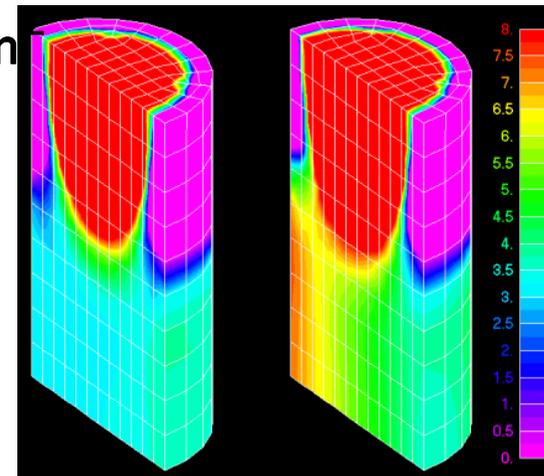


漏れセンサー

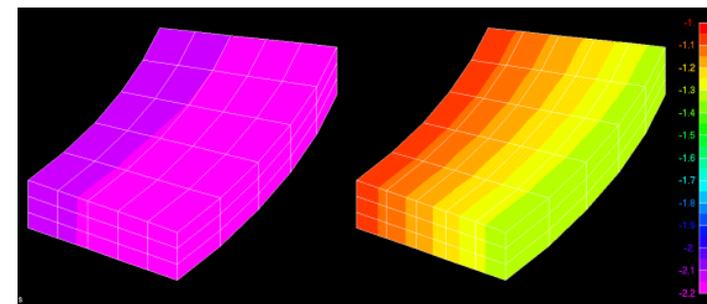
ボルト荷重  $F = T \text{onf}$ , 内圧  $P = 110 \text{ kgf/cm}$



F F+P  
フランジ構造部のMises応力



F F+P  
ボルトの軸方向

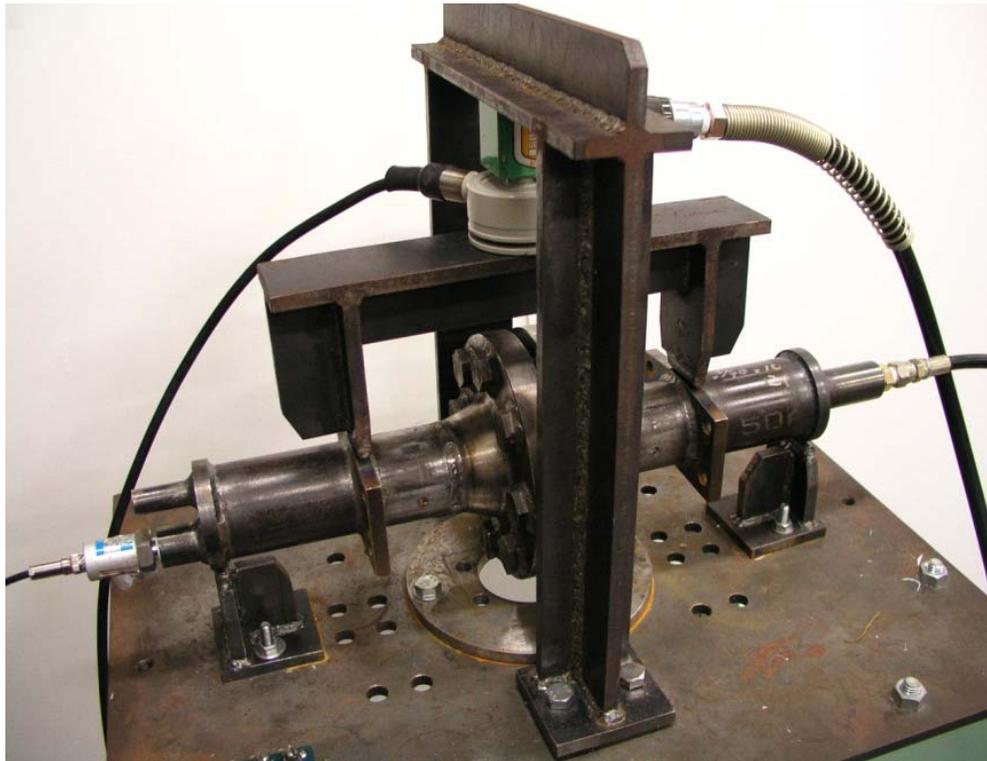


F F+P  
ガスケット面圧

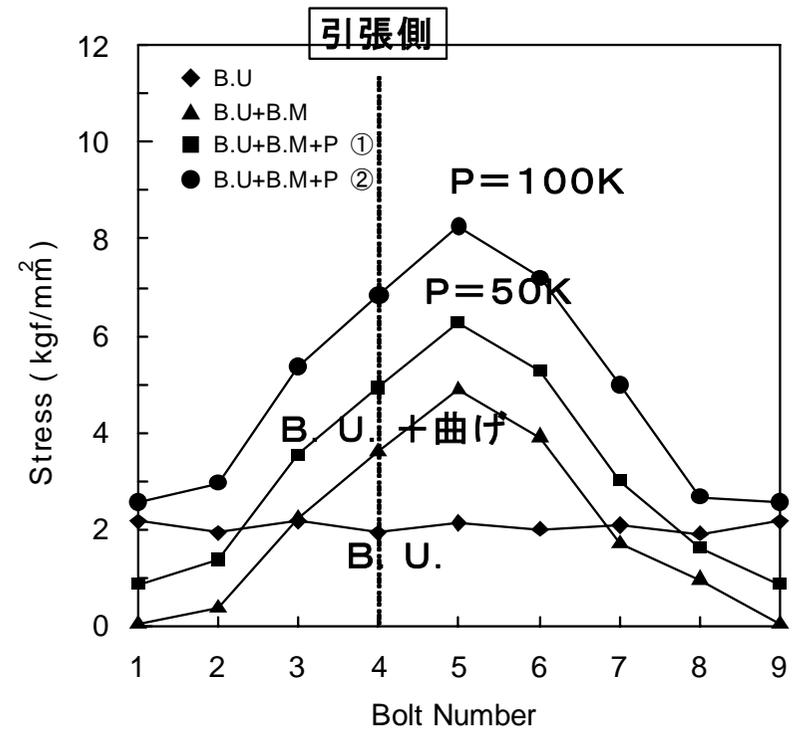
CASE B

内圧+曲げ

渦巻き形ガスケット



内圧+曲げ 実験装置

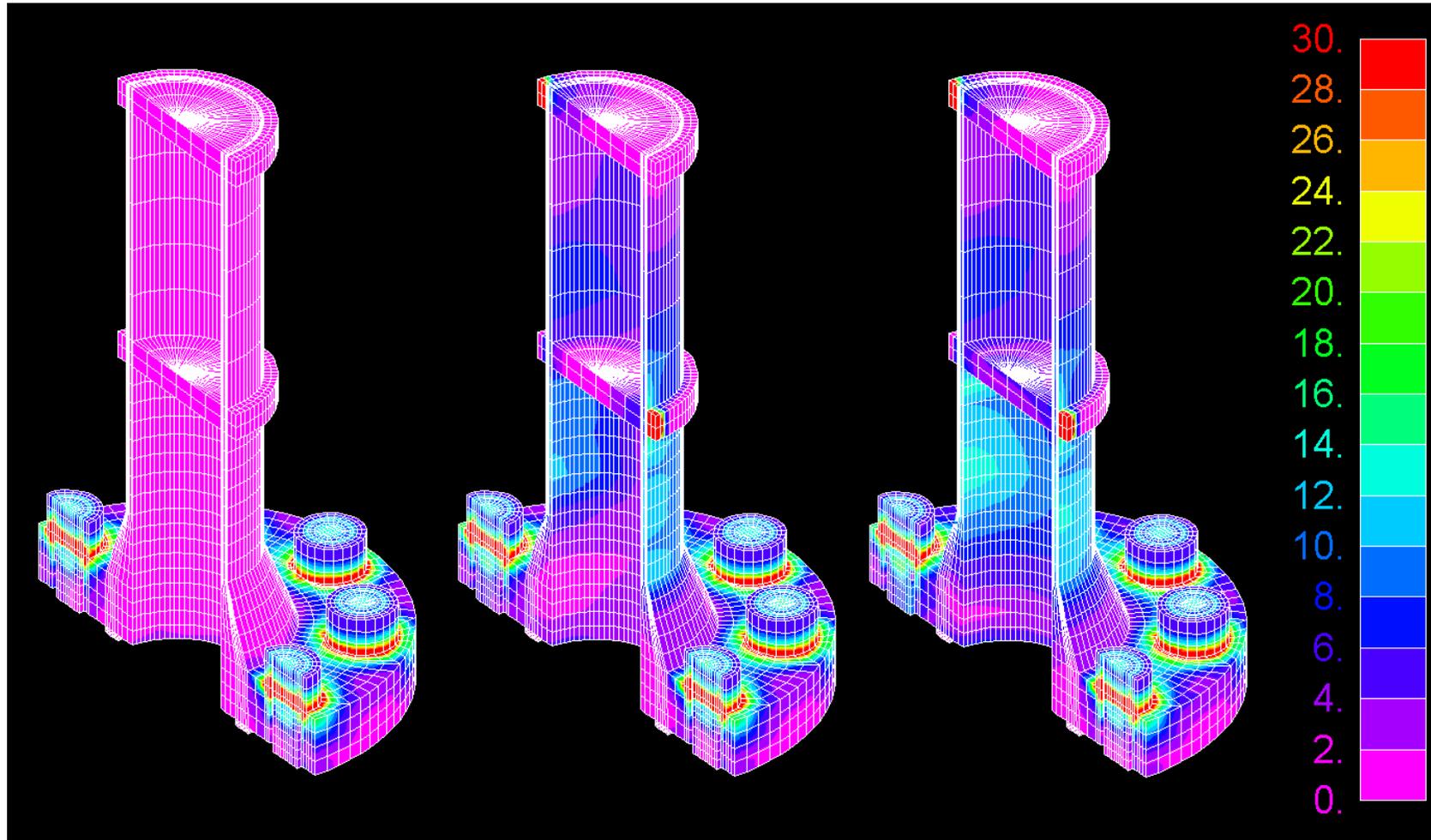


ボルト応力の変化

B.U 2500 (kgf)

B.M 0.1 (t · m)

P 100 (kgf/cm<sup>2</sup>)

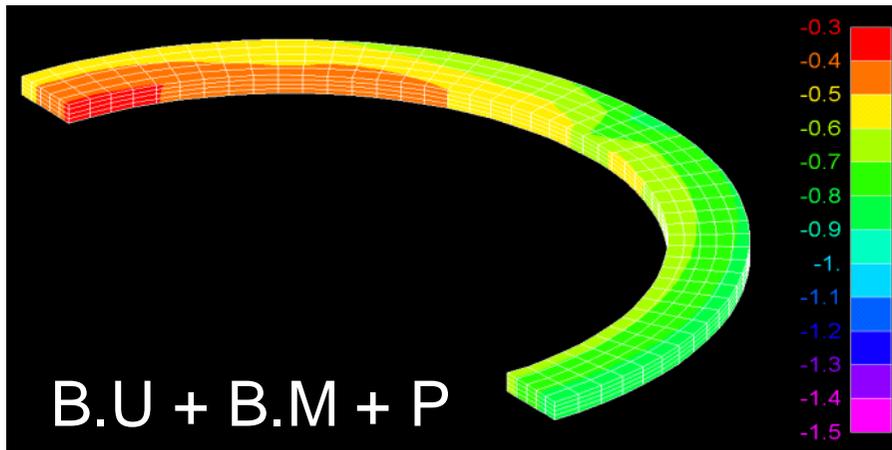
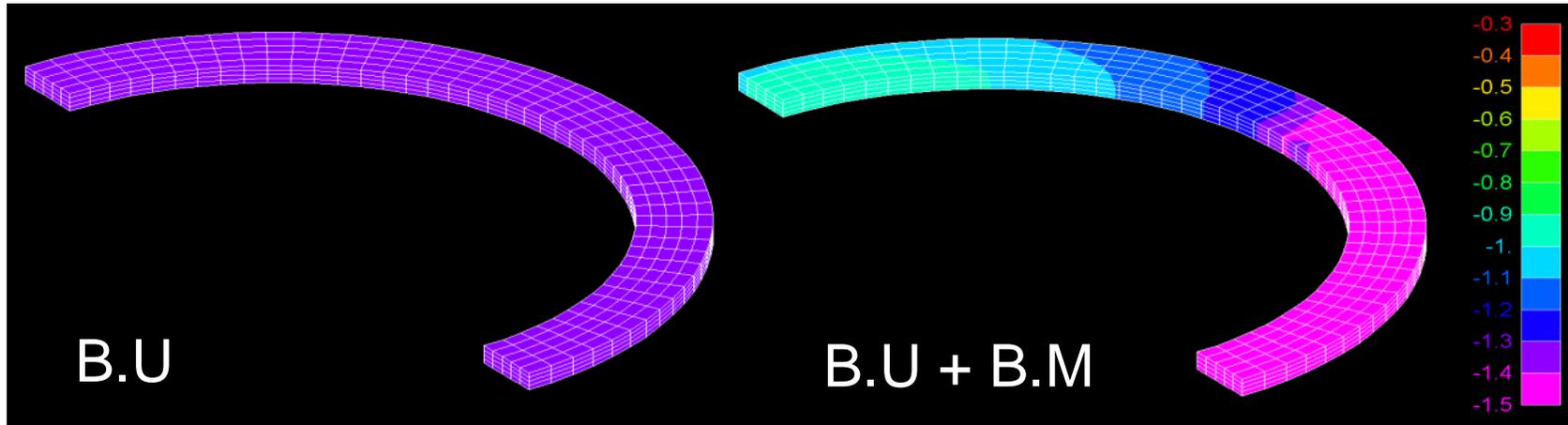
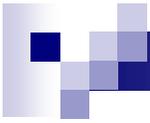


B.U

B.U + B.M

B.U + B.M + P

フランジ構造部のMises 応力



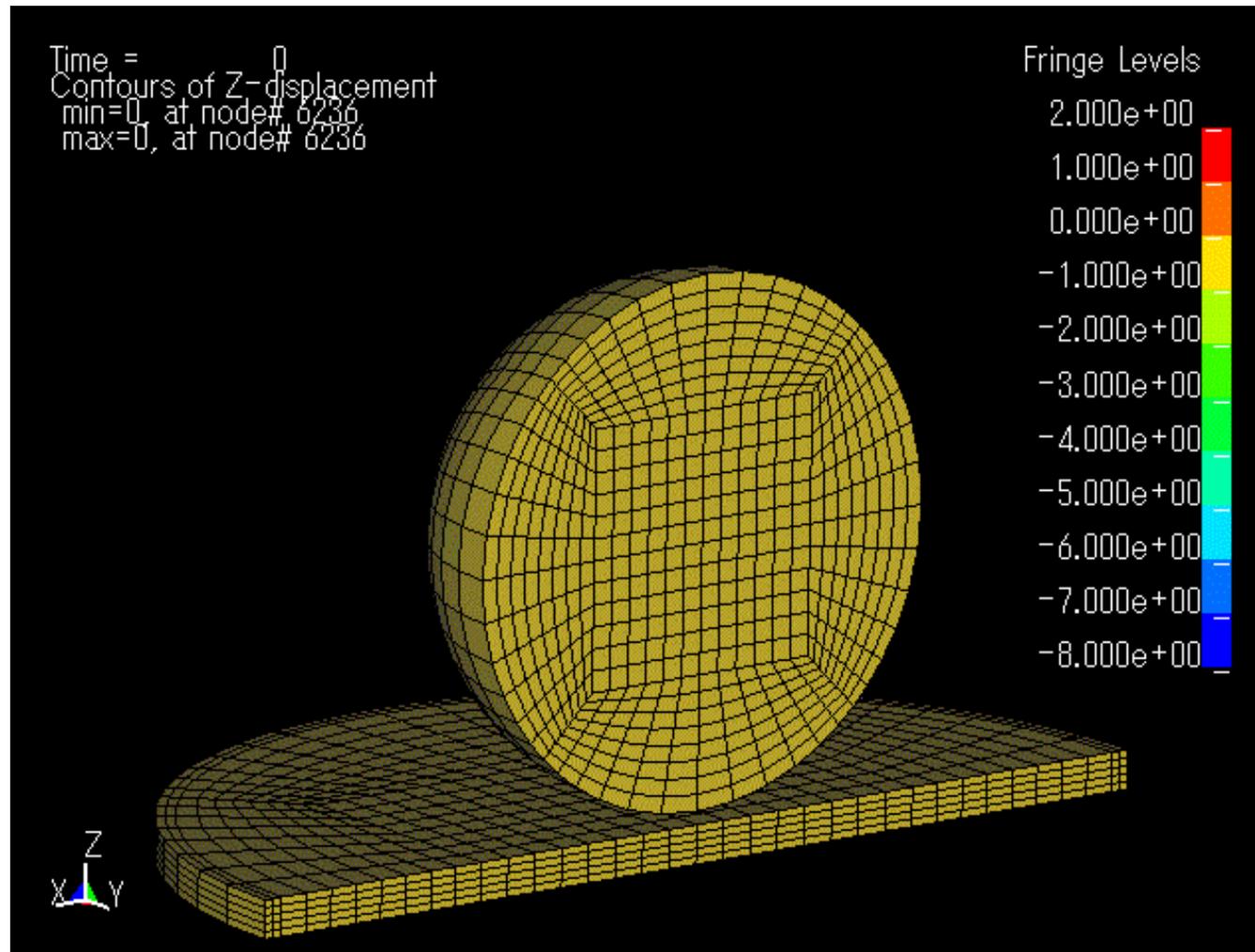
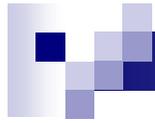
ガスケットの面圧

#### (4) 円板とゴルフボールの衝撃特性

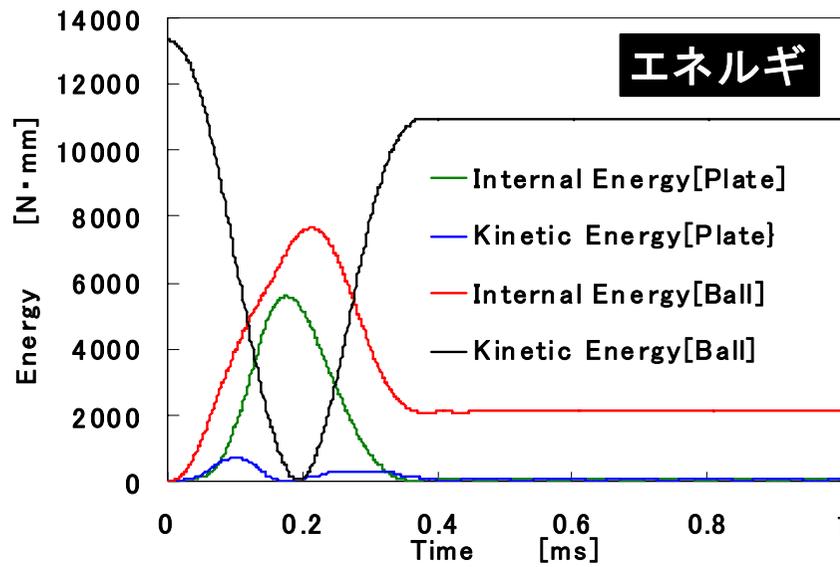
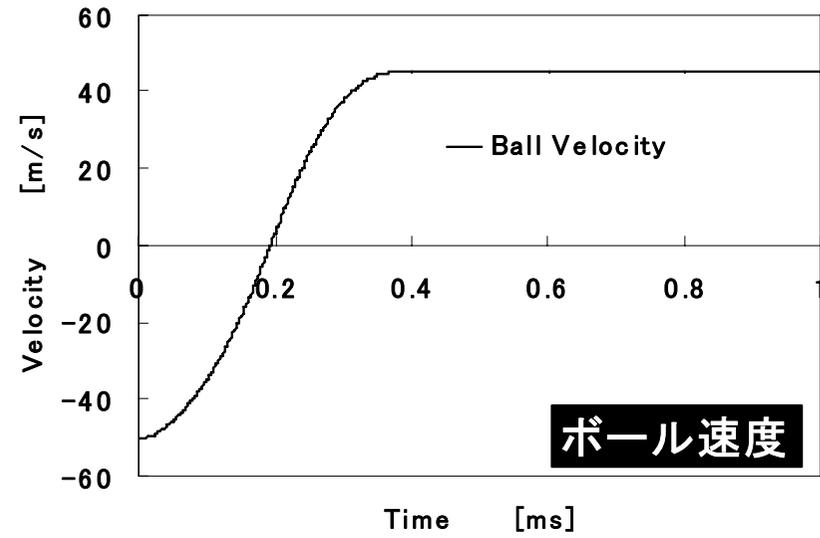
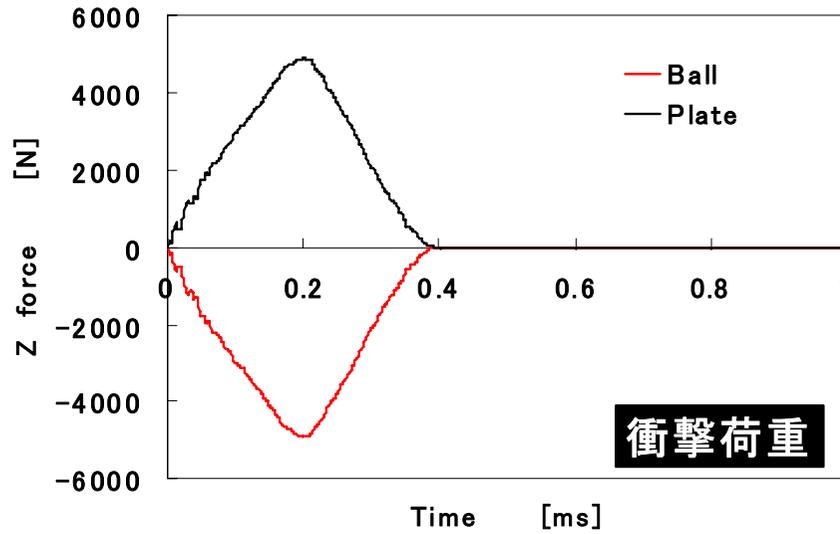
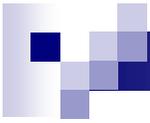
ドライバーショットにおけるボールとヘッドサーフェスとの衝突問題に対する影響パラメータによる衝撃特性

ボール	D社製／2ピースボール(粘弾性)	
ヘッドサーフェス (弾性円板)	材質	Al合金、Ti合金、SUS
	板厚	1, 3, 5 mm
	直径	60, 80, 100 mm
ヘッドスピード	20, 35, 50 m/s	
解析ソフト	LS-DYNA	
実験	自由落下、円板のひずみ、ボールの速度	

衝撃特性要素	①反発係数 ②最大衝撃力 ③接触時間 ④エネルギー割合
--------	--------------------------------



ボールと円板の変形(速度50m/s)  
円板 ; Ti合金、 $t3 \times \Phi 80$



## 衝撃特性

## (5) 耐圧ペットボトルの構造挙動と耐圧強度

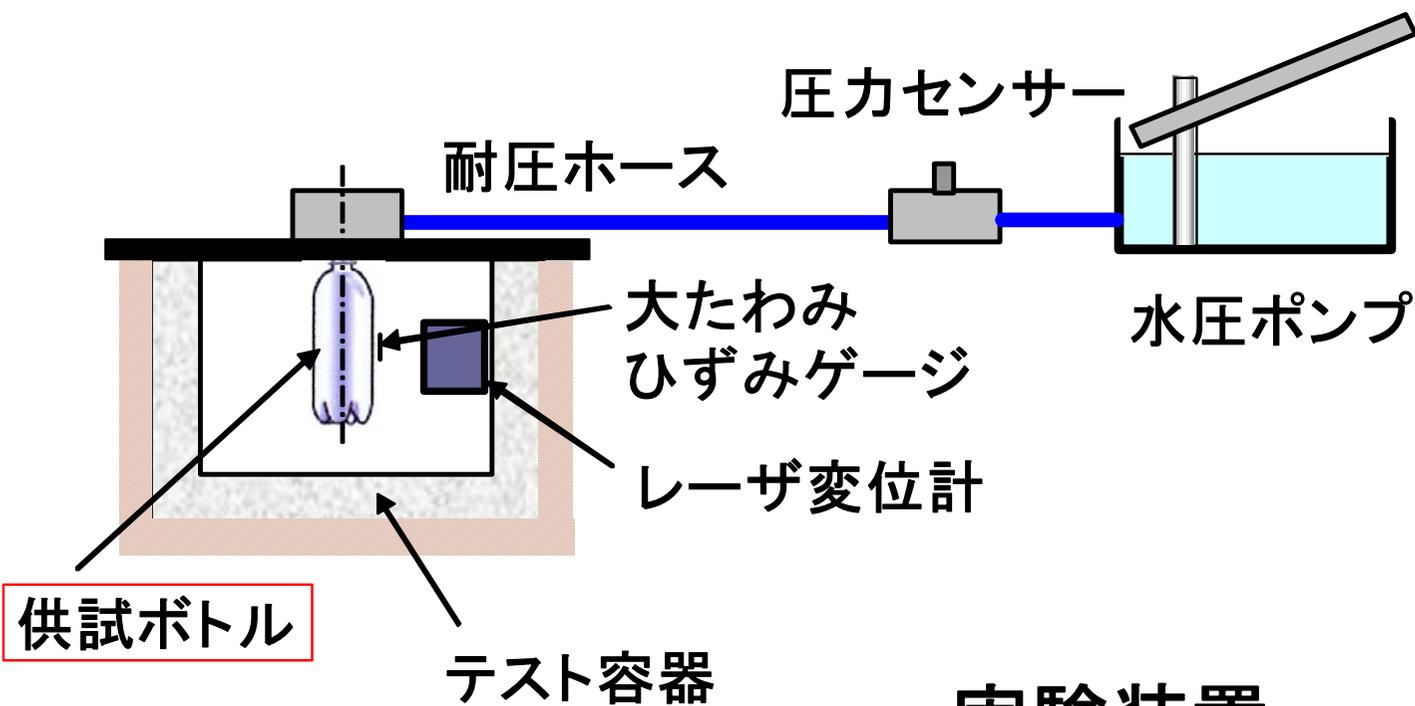
- ・耐圧ペットボトルについて内圧負荷時の構造挙動
- ・破裂実験による耐圧強度

対象構造	材質	PET
	形状寸法	市販の500ml炭酸飲料ペットボトル
荷重	内圧	
解析法	シェル要素による大たわみ材料非線形解析	
実験	材料試験	JISによる引張試験
	実機モデル	ひずみ、変位計測
		破裂圧力

材料試験：岡山県工業技術センター／有機材料研究室



ペタロイド

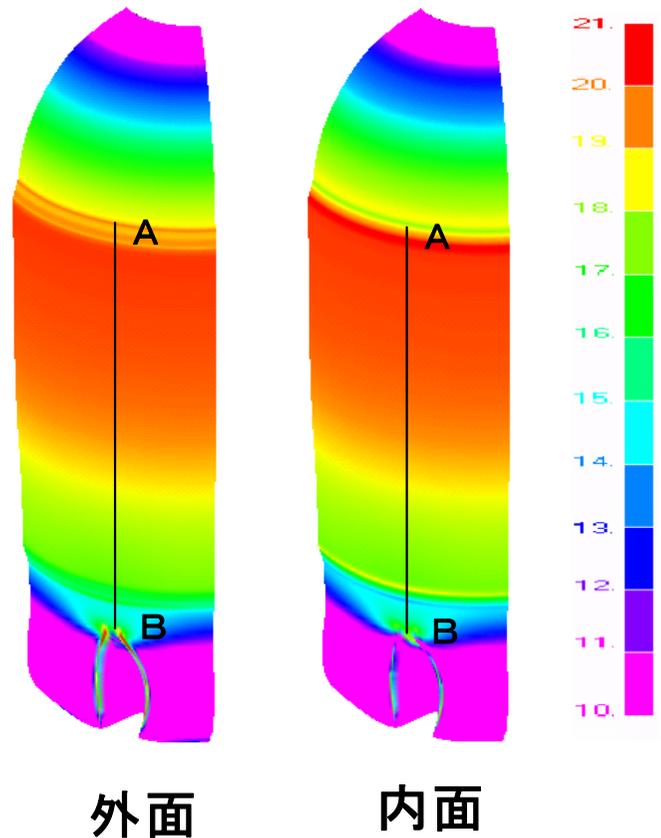


## 実験装置

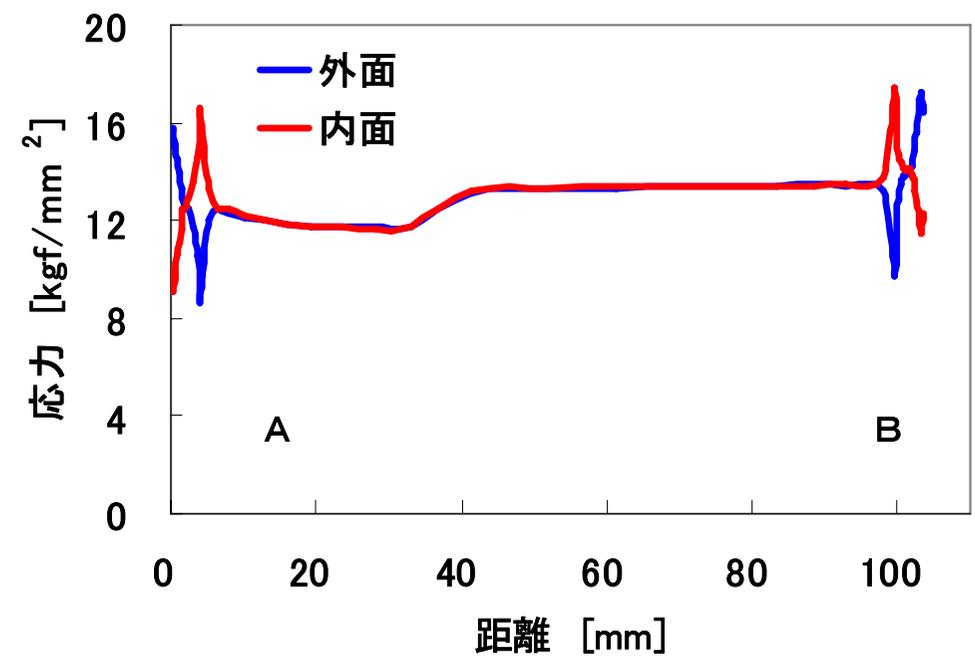


タイプ	L形	I形	拡散形
破裂個数	4	3	4
破裂圧力	1. 97 ~ 2. 29 Mpa		

## 実験結果



Mises応力 (压力: 2MPa)

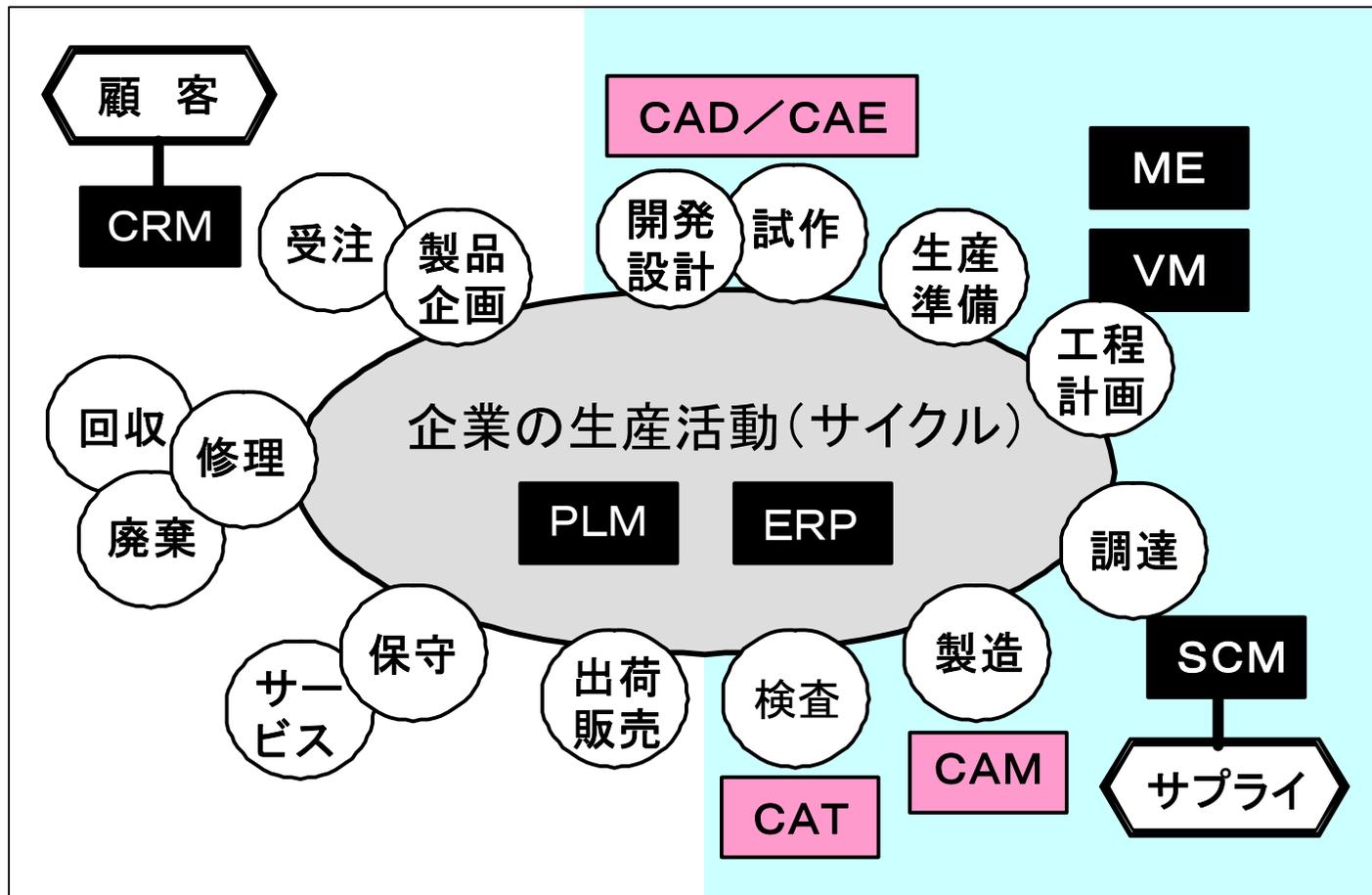


子午線方向応力 (压力: 2MPa)

# FEM解析結果

## II 機械構造物の実用解析事例の紹介

### 企業の生産活動とデジタルエンジニアリング





## <ものづくりにおけるCAE技術の活用(狙い)>

### ①現象の精度良い把握

- ・ CAE解析結果は可視化可能
- ・ 現象の理解やメカニズムの考察が容易

### ②製品開発のスピードアップ

- ・ CAEによる事前検討により性能予測や最適構造を絞り込み試作や実験回数を低減
- ・ 製品開発のリードタイムの短縮, 開発コストの削減

### ③解析に基づく機器の設計

- ・ CAEによる詳細な解析により合理的な設計が可能  
製品のコストダウン、機器の性能向上  
従来の経験では対応できない製品の設計

### ④トラブルシューティング

- ・ 製品不具合の原因の追及や有効な改善策の立案が容易

## A, 振動・衝撃問題

コンテナクレーン 大型化、高速化、耐震、振れ止め



コンテナヤード

# ヤードクレーン

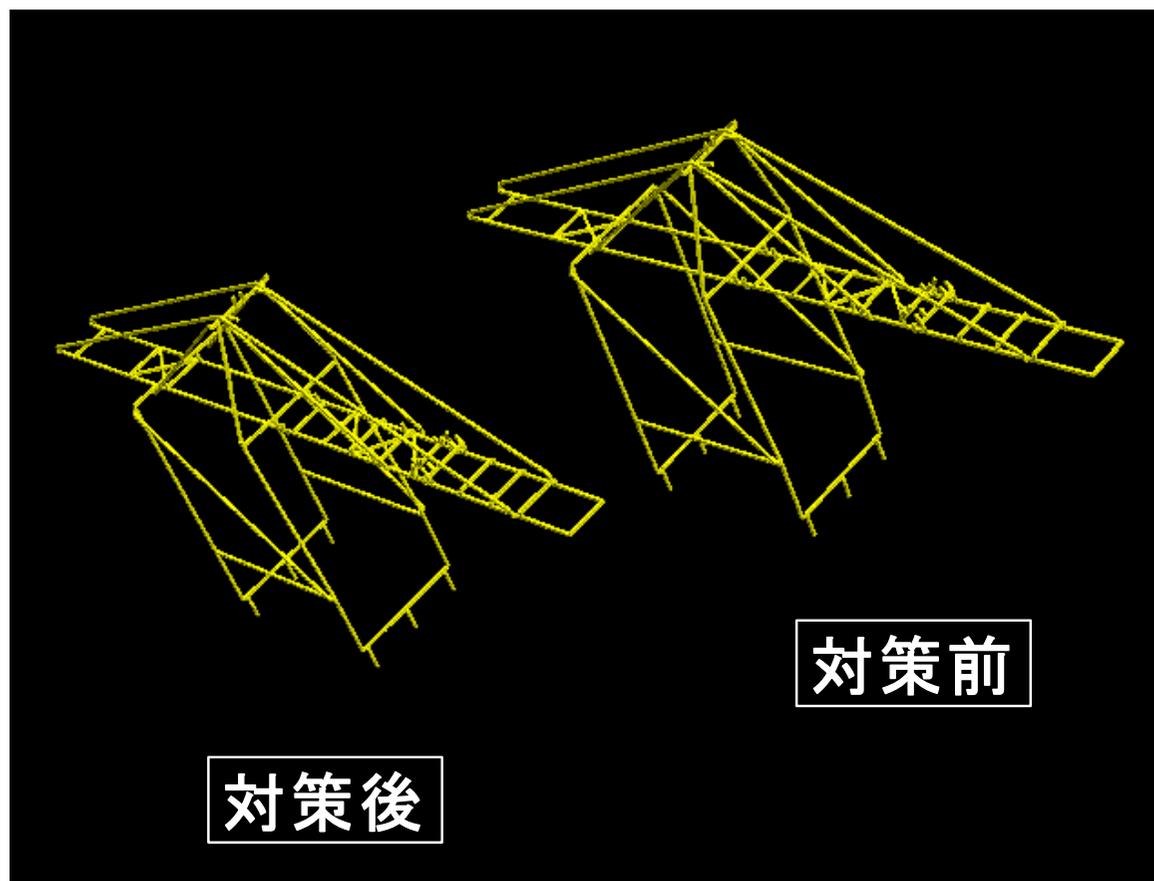
- ・全体モデルによる振動応答解析
- ・駆動機関、発電機の防振支持



全体解析モデル

# 岸壁クレーン

- ・地震時挙動のシミュレーション
- ・振動低減のための動的応答解析



# 大型タンク

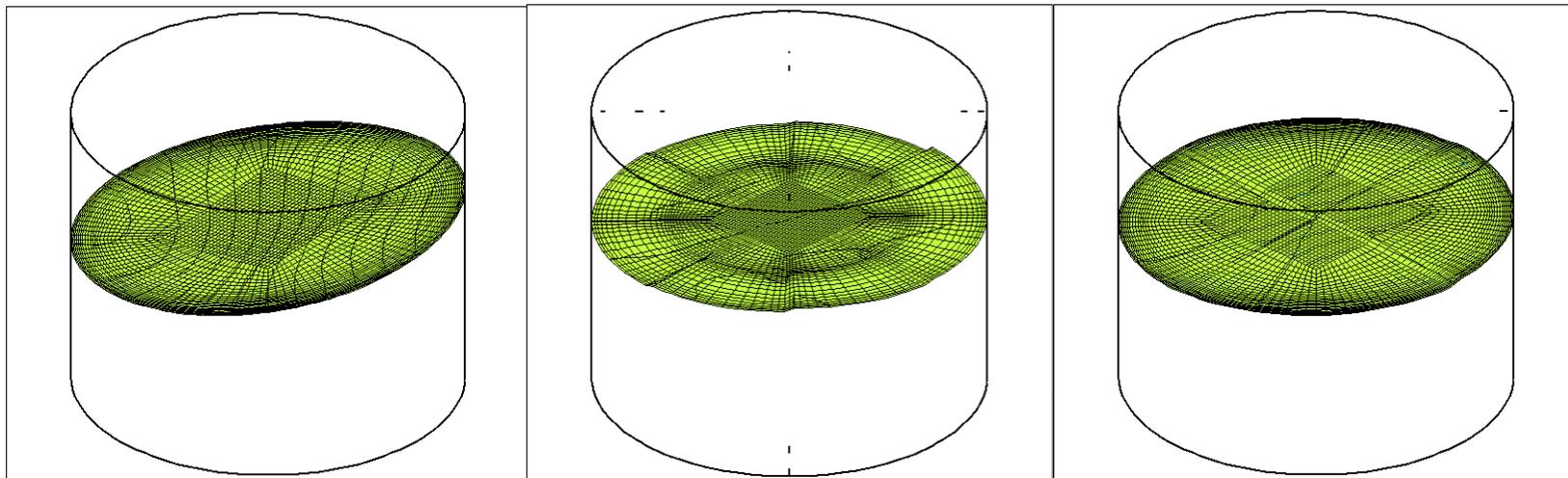
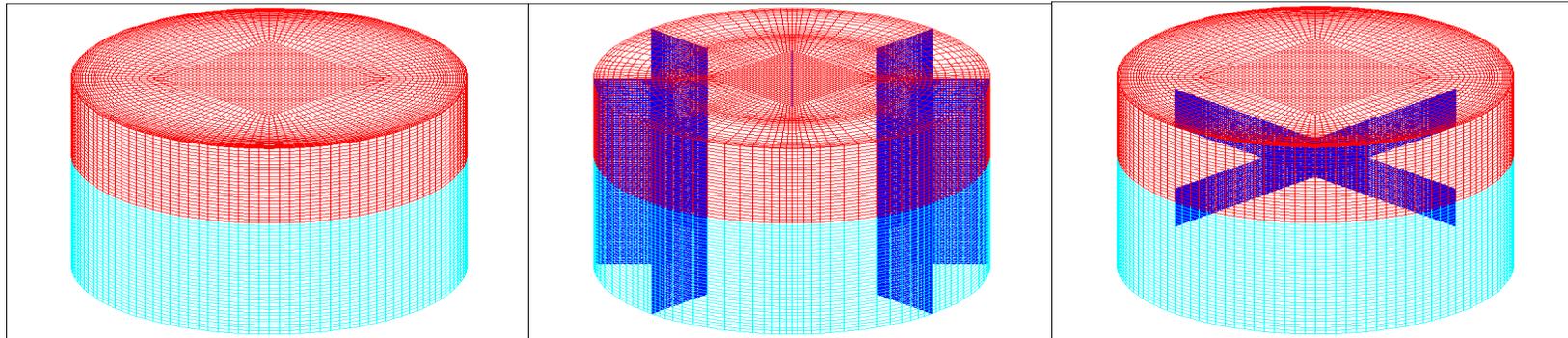


石油備蓄タンク

大地震時のスロッシング  
による震害防止対策

# 大型タンクのスロッシング

- ・地震時のスロッシング応答
- ・抵抗板による制振効果と設計

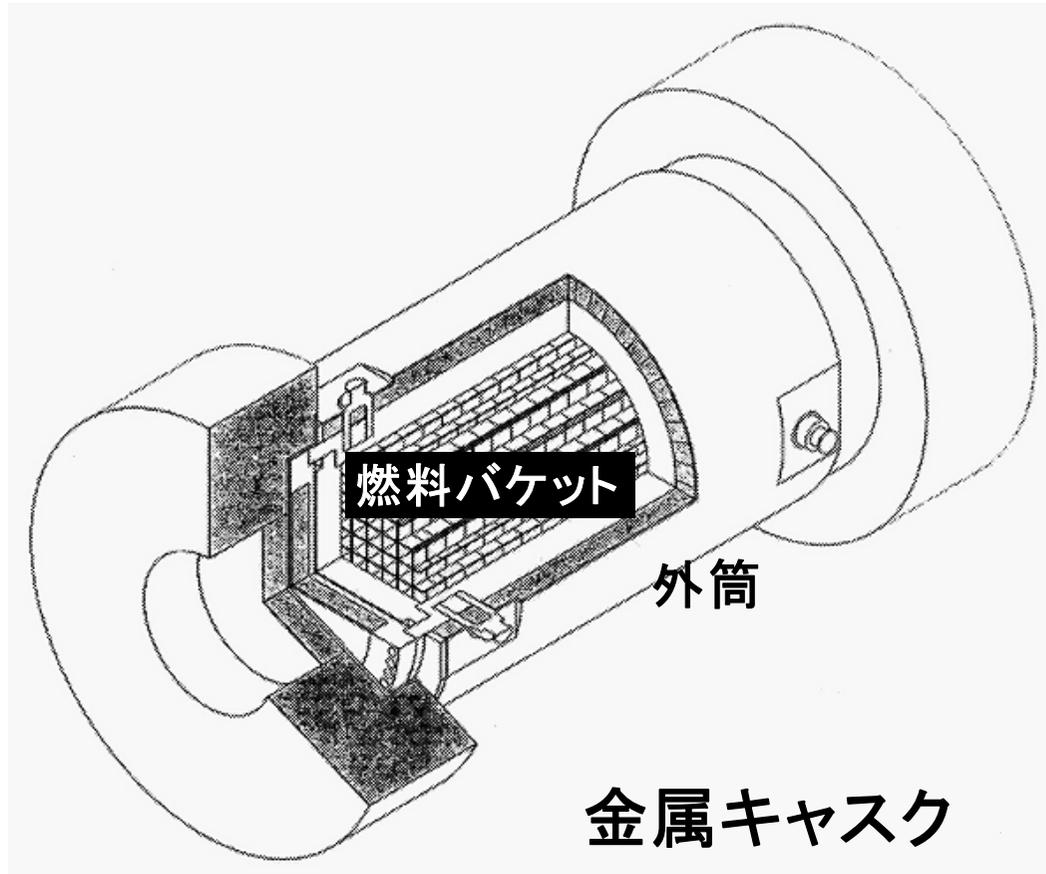


制止板なし

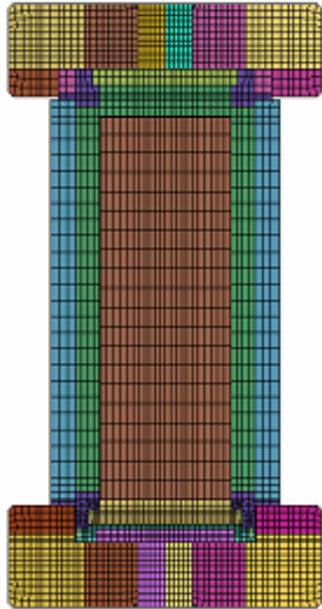
側面制止板

自由表面制止板

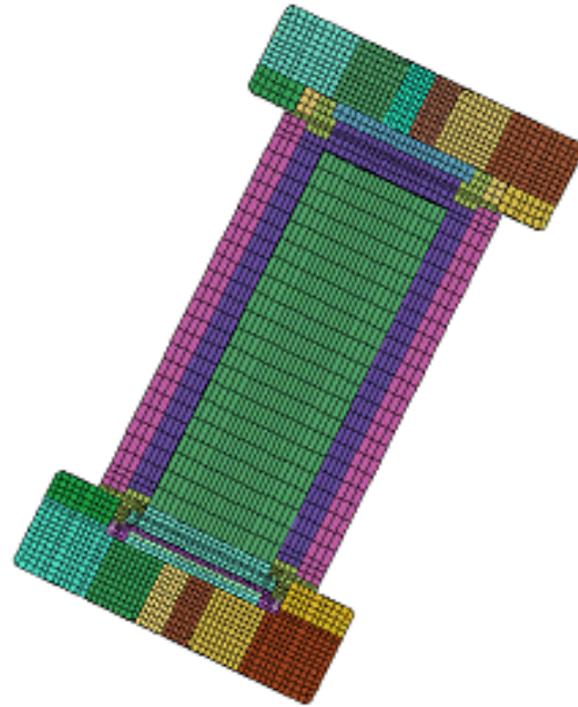
# キャスクの落下衝撃



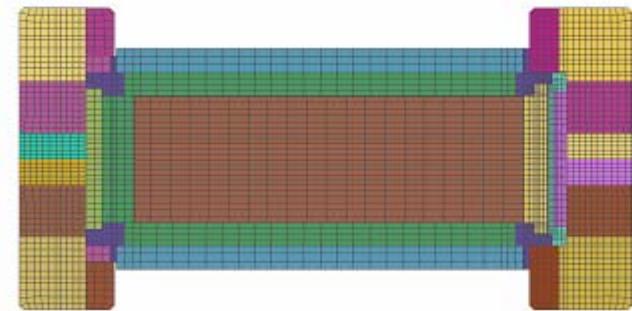
- ・キャスクの設計開発
- ・9m落下時の健全性確保



垂直落下

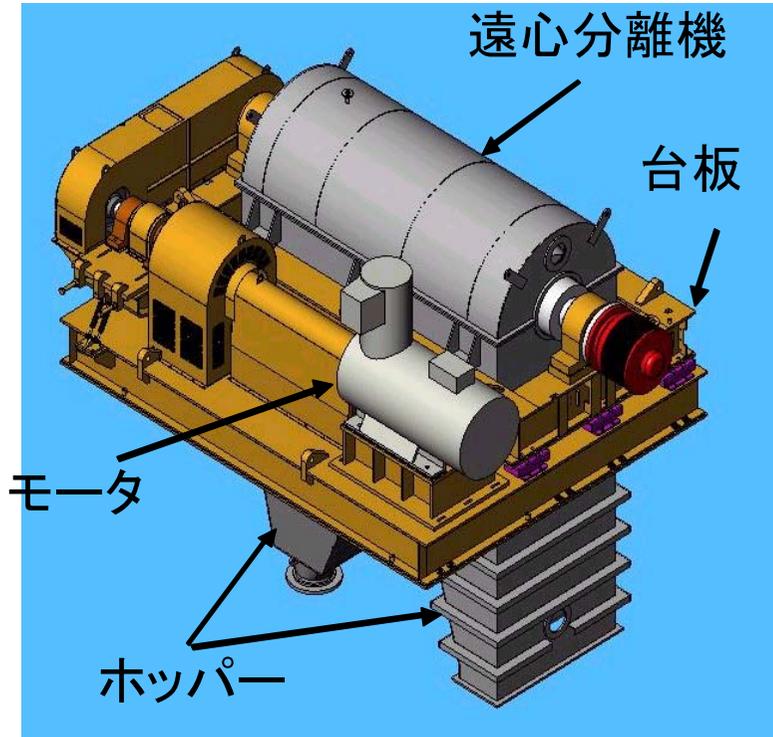
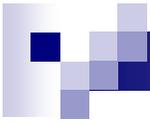


コーナ落下



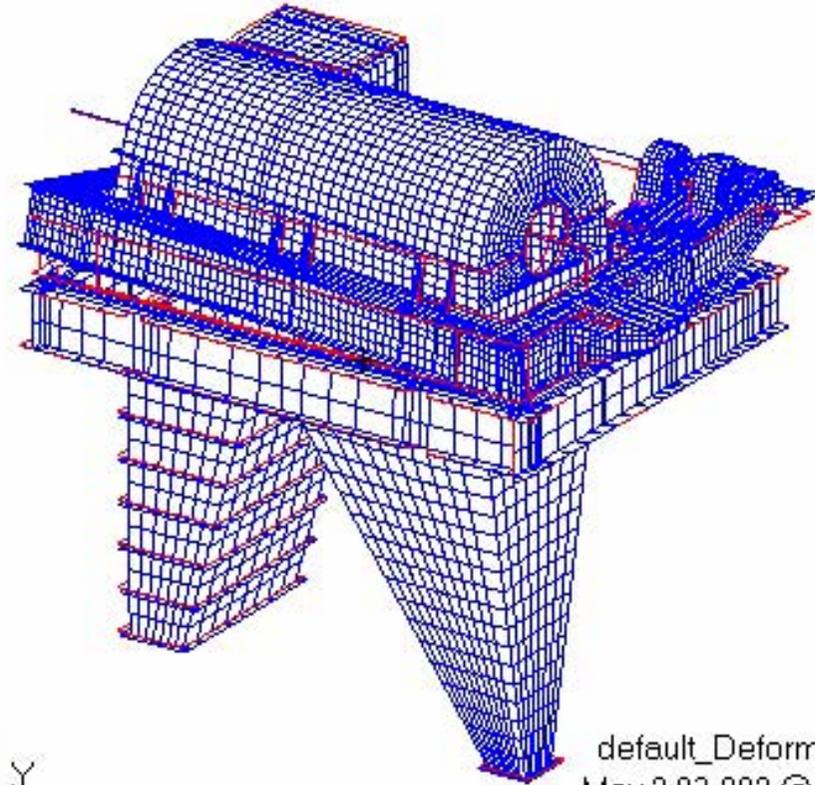
水平落下

## カassetの落下衝撃解析



## 遠心分離機

- ・固有振動解析
- ・構造全体の振動低減対策



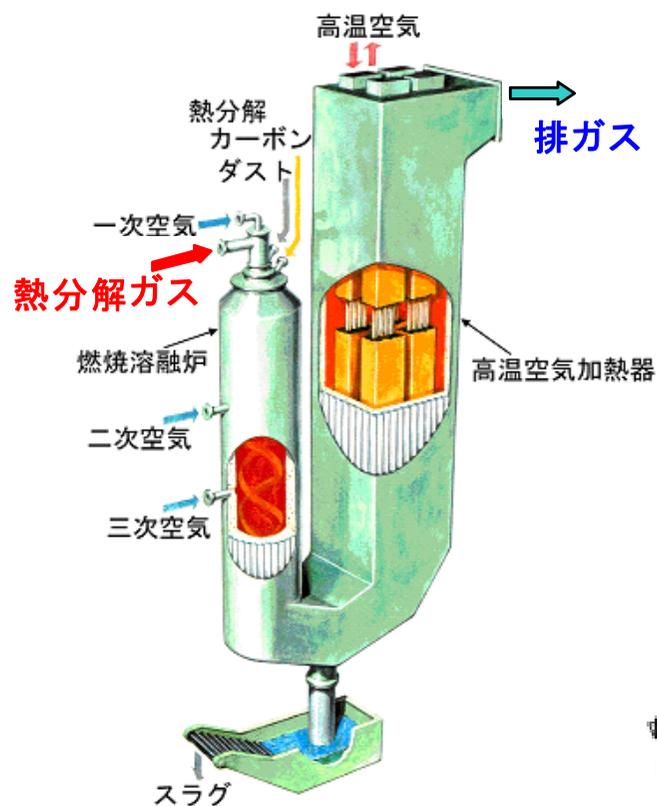
default\_Deformation :  
Max 2.03-002 @Nd 870  
Frame: 1  
Scale = 1.00+000

## B, 熱・流動問題

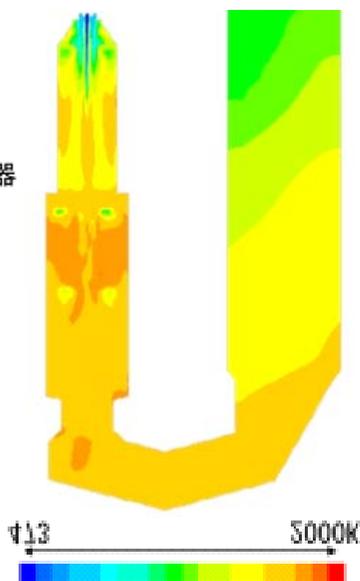


燃焼設備からの汚染物質排出抑制  
と性能向上

# 燃焼炉系の燃焼解析



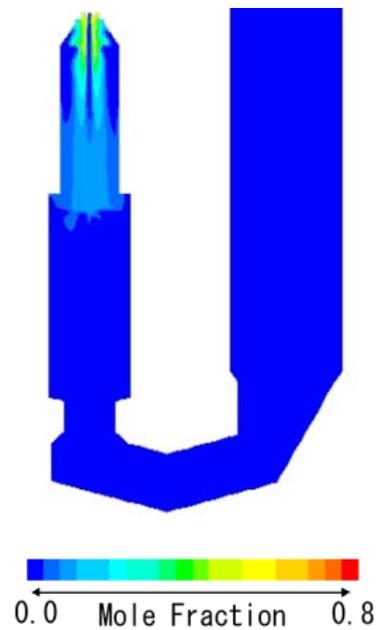
燃焼熔融炉と  
高温空気加熱器



排ガス温度

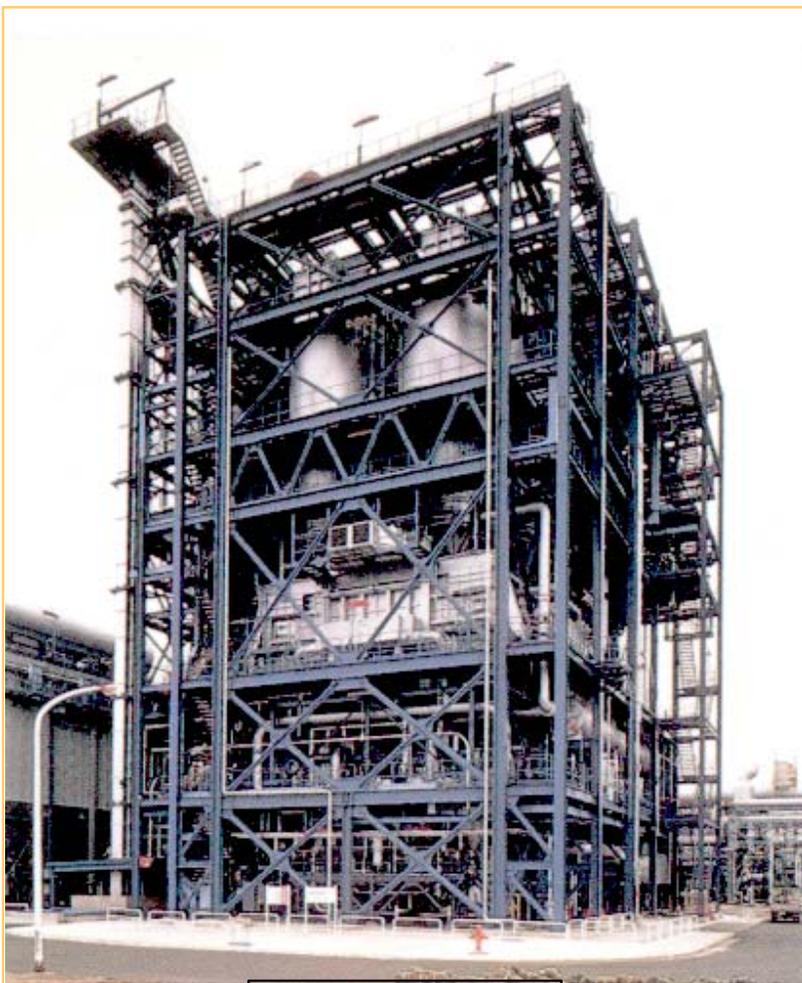


O<sub>2</sub>濃度



CO<sub>2</sub>濃度

# 流動層ボイラ



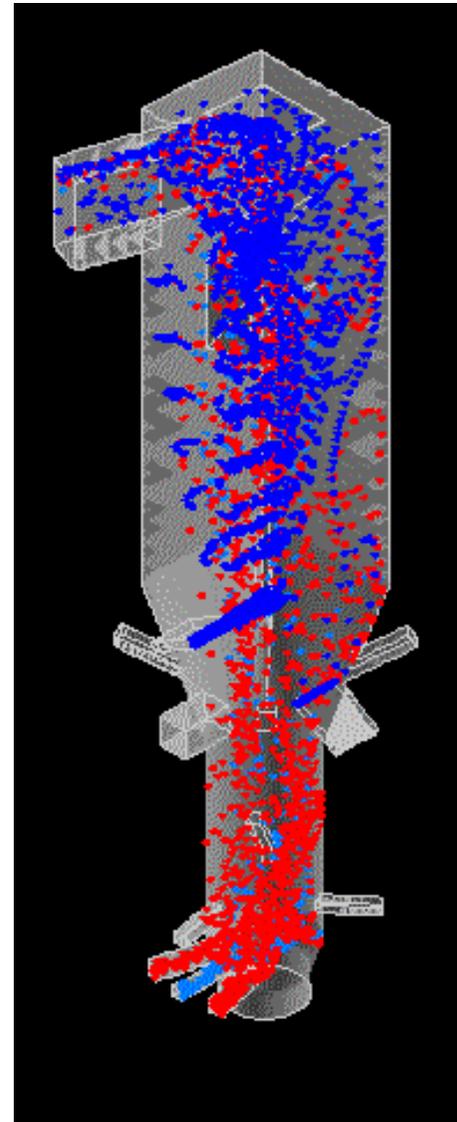
流動層ボイラ

石炭燃料のクリーン燃焼  
と性能向上

流動層流動解析  
(DEM法)

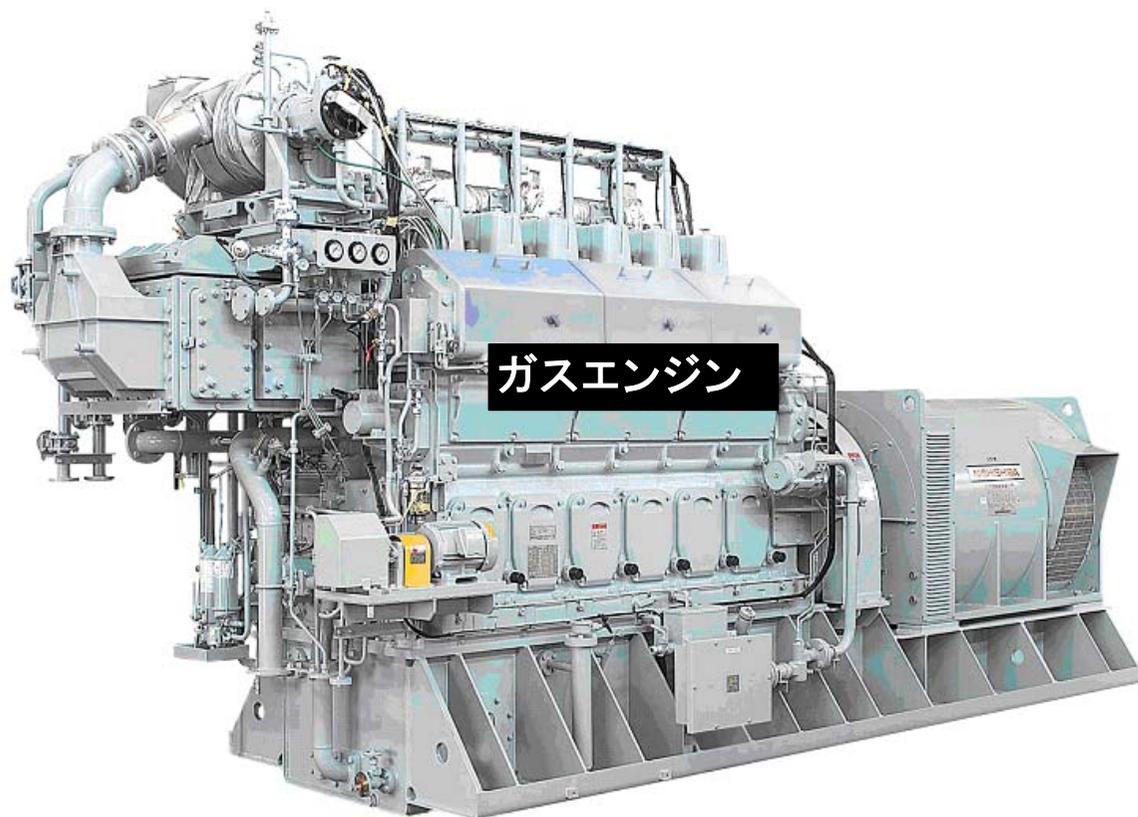
固気流動解析

燃焼器



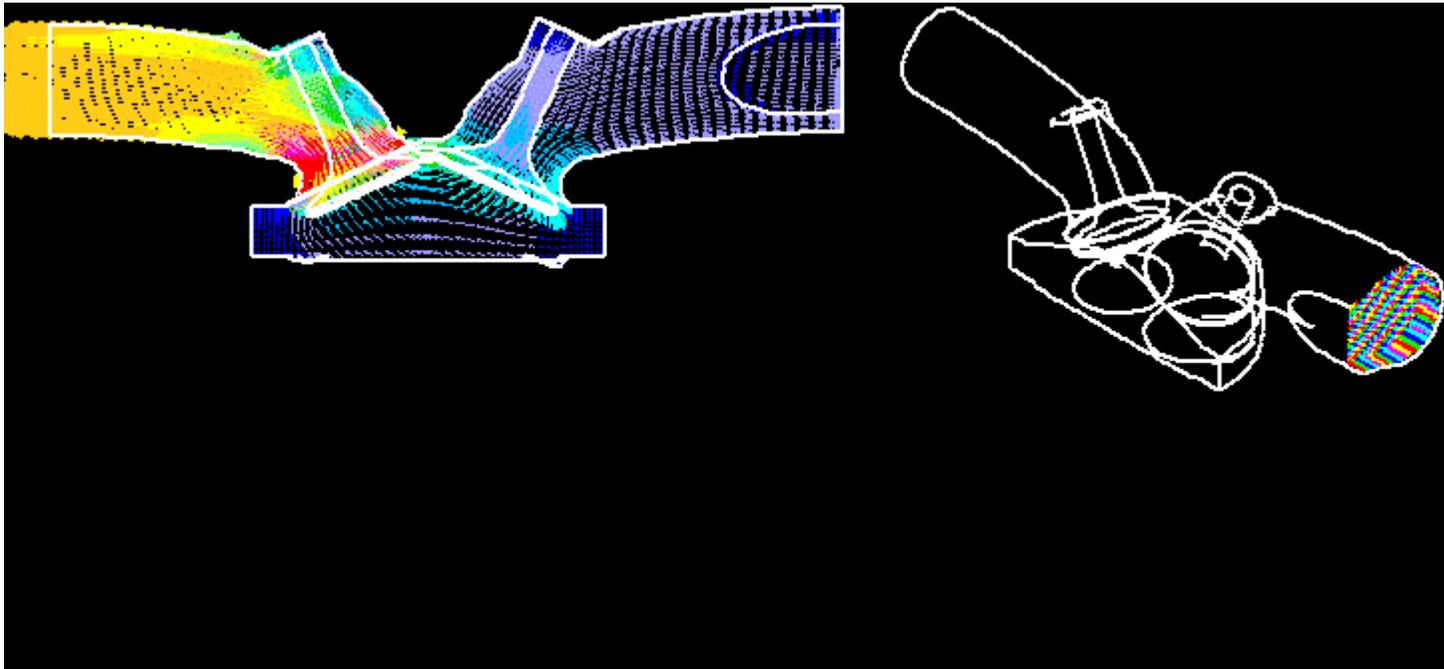
熱流動解析

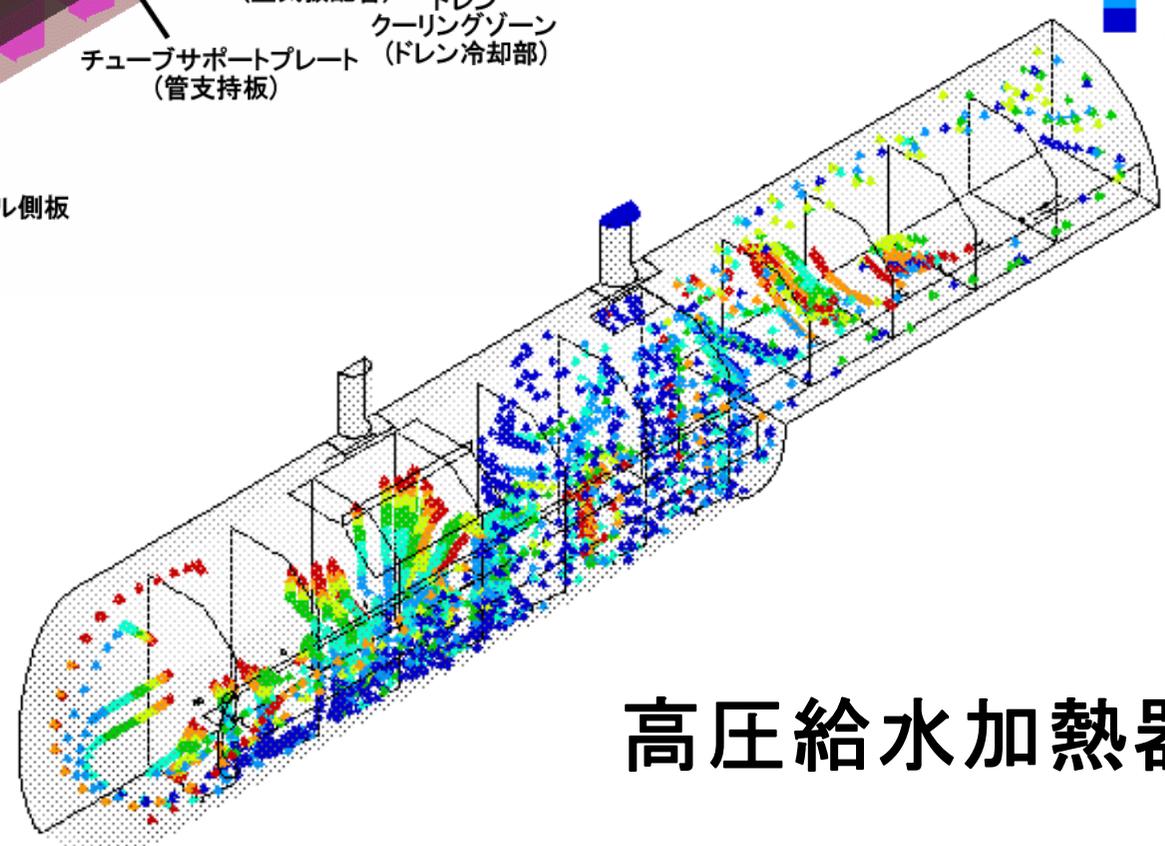
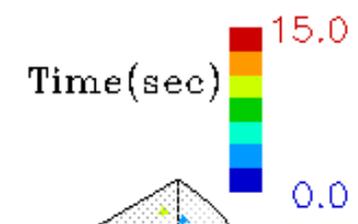
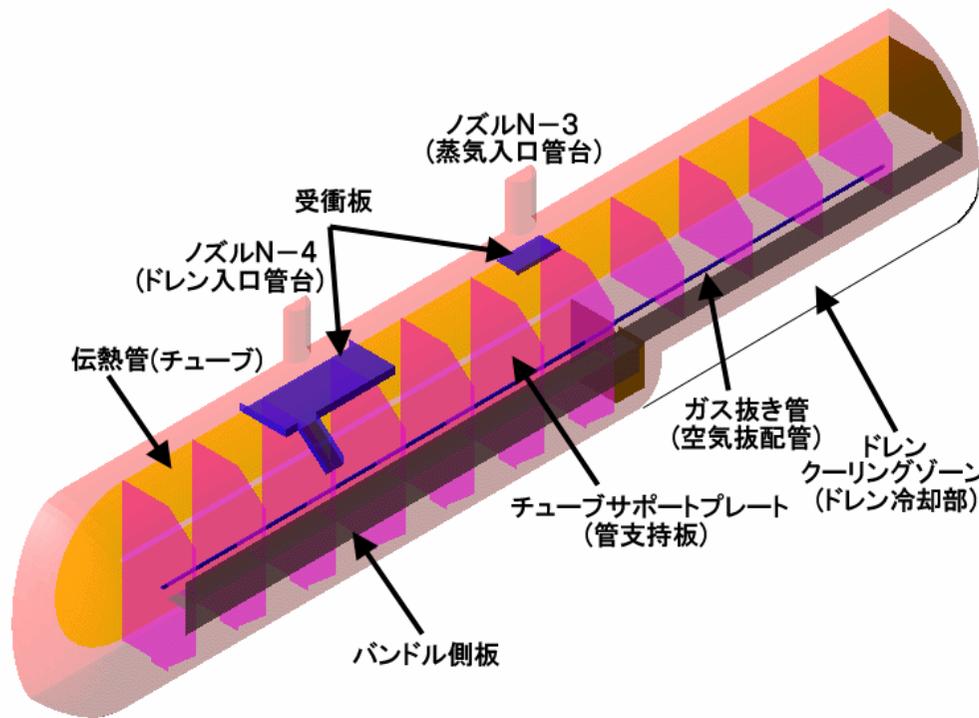
# ガスエンジン



熱電可変-高効率  
天然ガスコージェネシステム

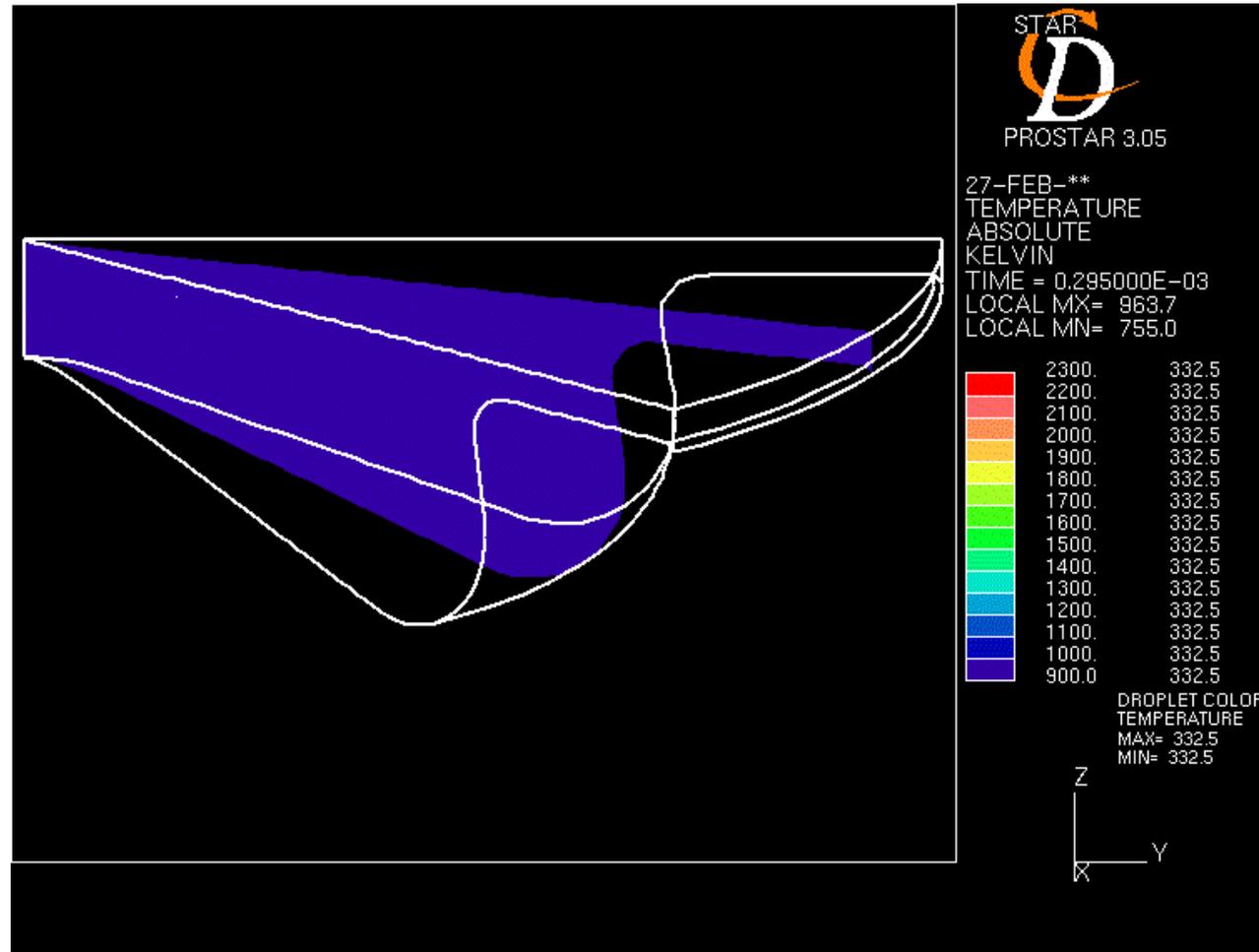
# ガスエンジンの燃焼解析





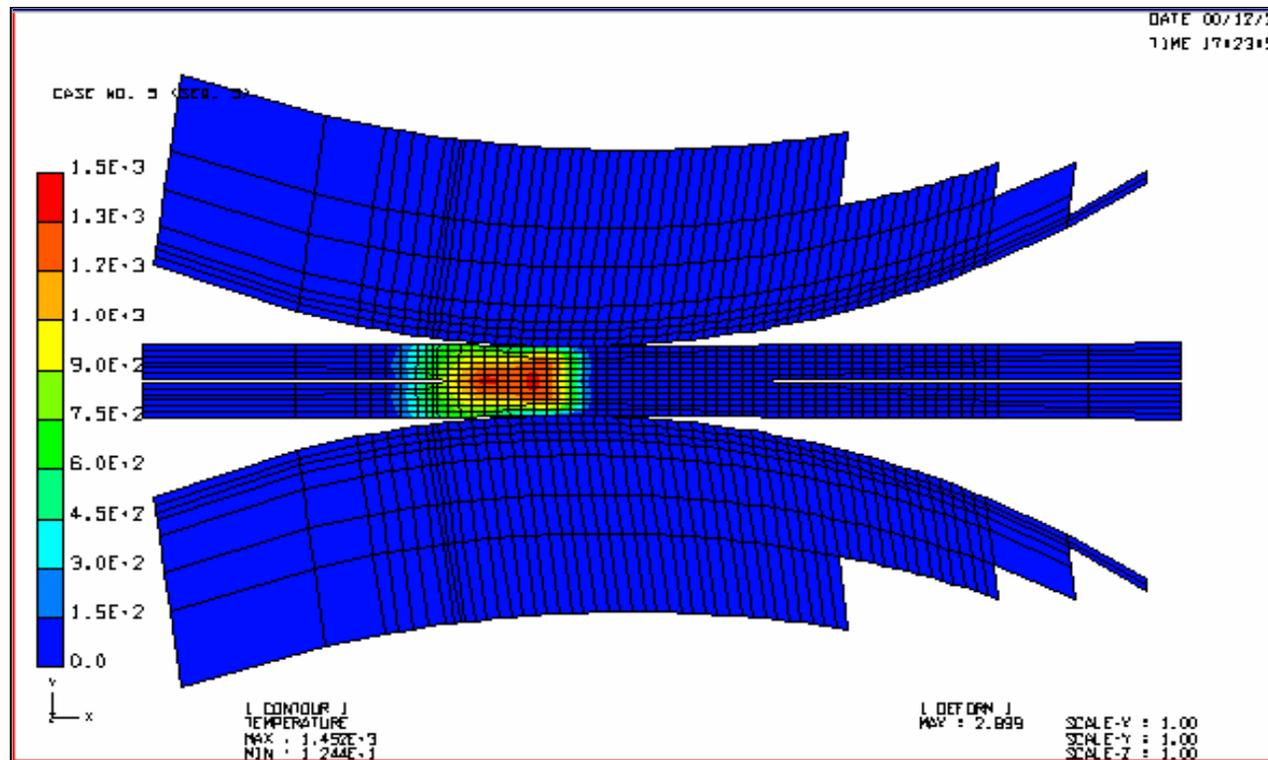
高圧給水加熱器

# D.E.の燃焼解析



温度分布と粒子の軌跡

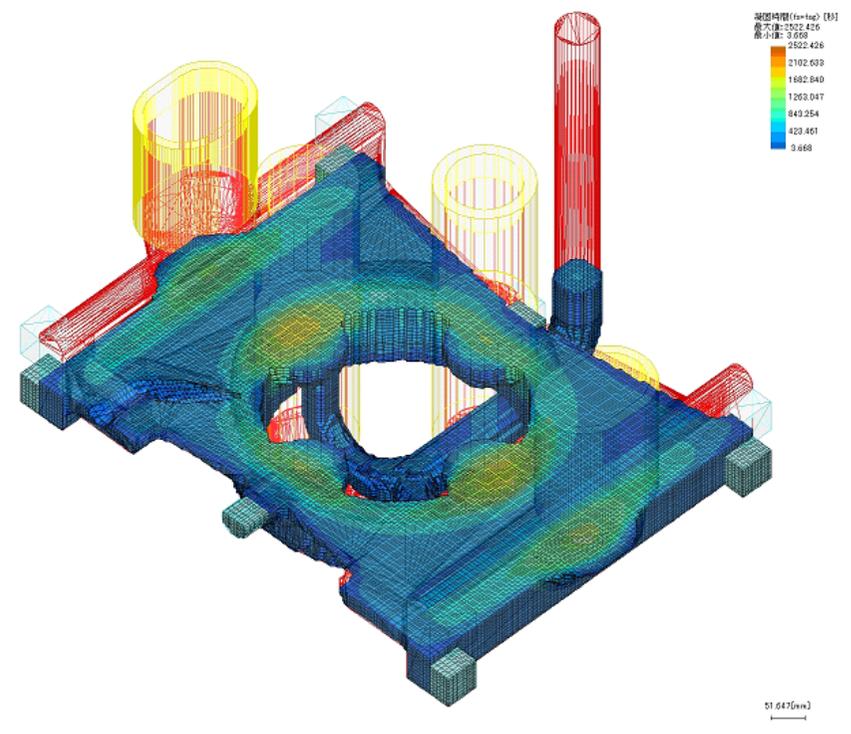
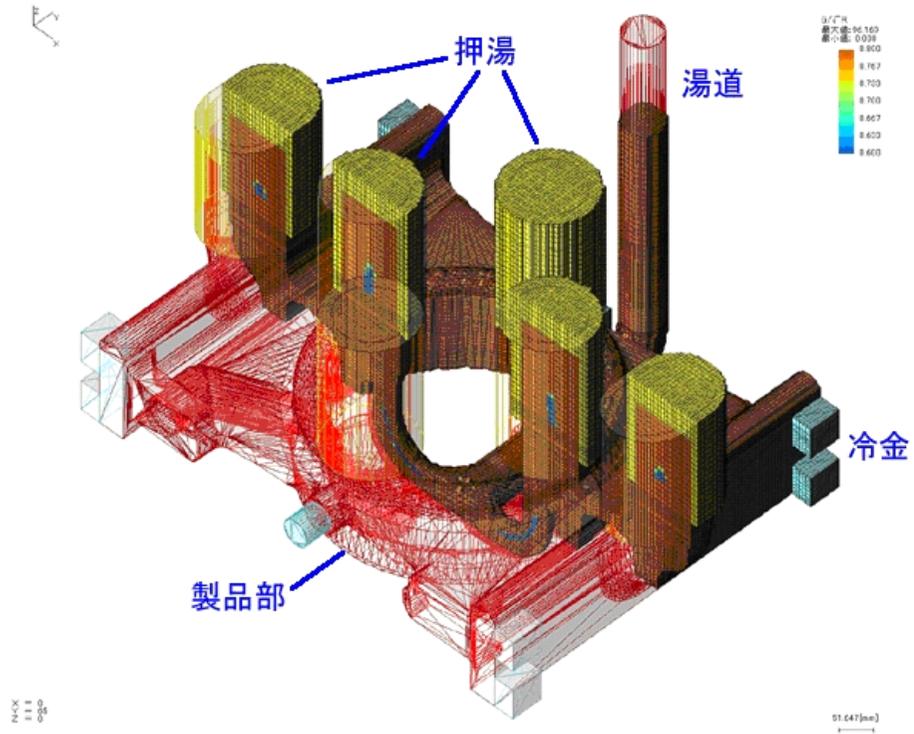
## C-1 溶接シミュレーション



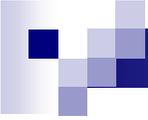
LNGタンク溶接ビードシミュレーション

LNGタンク自動抵抗シーム溶接  
の施工条件適正化

# C-2 鑄造シミュレーション



ディーゼルエンジン部品  
鑄造欠陥防止方案と歩留まり向上



# Ⅲ リスクベースエンジニアリングについて

## 1. リスクについて

### (1) リスクの一般的定義

「事象の発生確率と事象の結果の組合せ」

- ・社会が進歩し複雑化するにつれてリスクも多様化
- ・関連する社会、分野などにより定義は微妙に異なる

### (2) リスクの例

経済分野：金融リスク、投資リスク、為替リスク、商品開発リスク

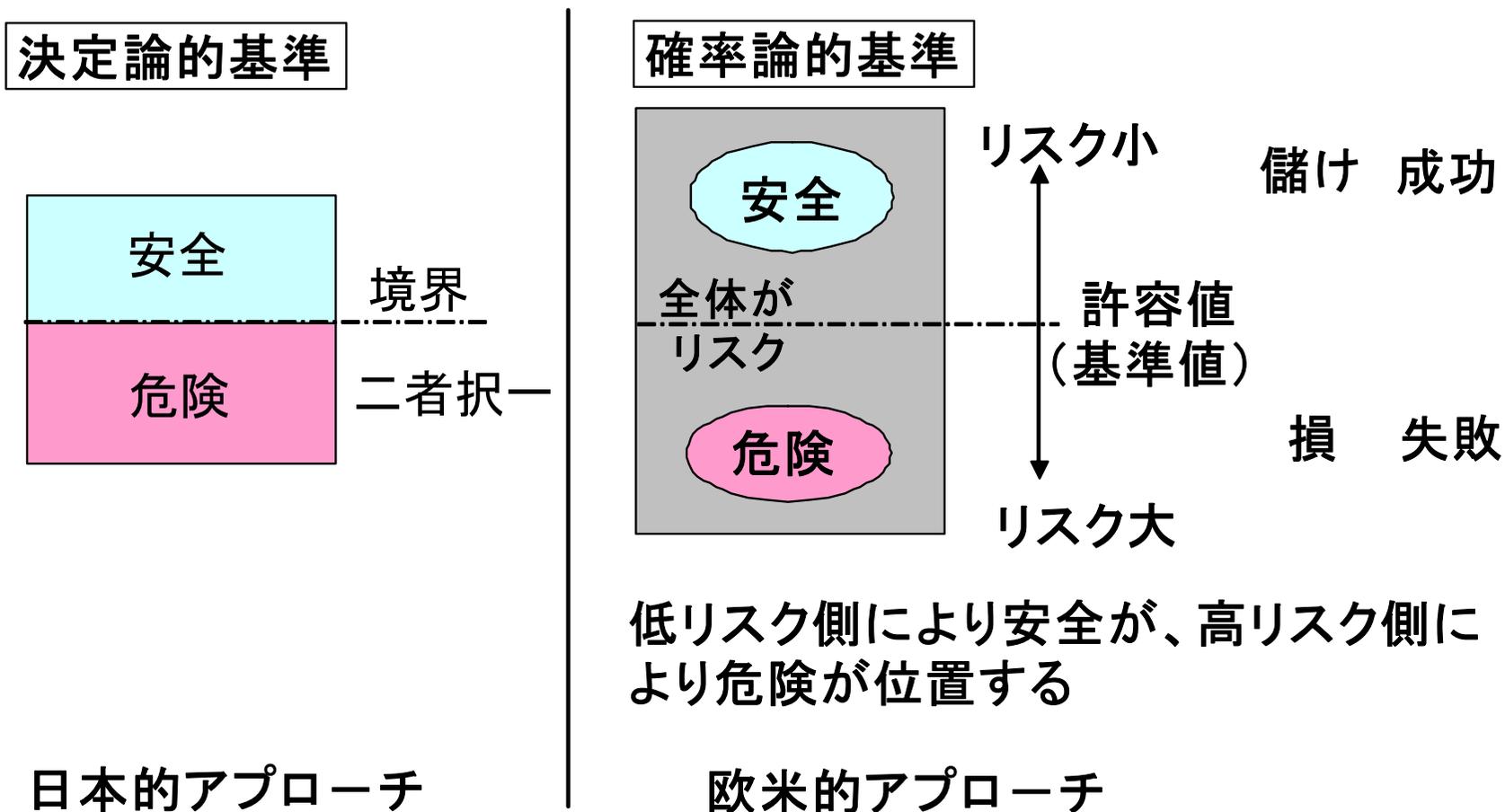
技術分野：環境リスク、労働安全リスク、機械安全リスク

自然分野：地震リスク、台風リスク、風水害・濁水リスク、落雷リスク

その他 火災リスク、爆発リスク、建築物倒壊リスク

### (3) リスクの概念

”決定論的考え方の行き詰まり”



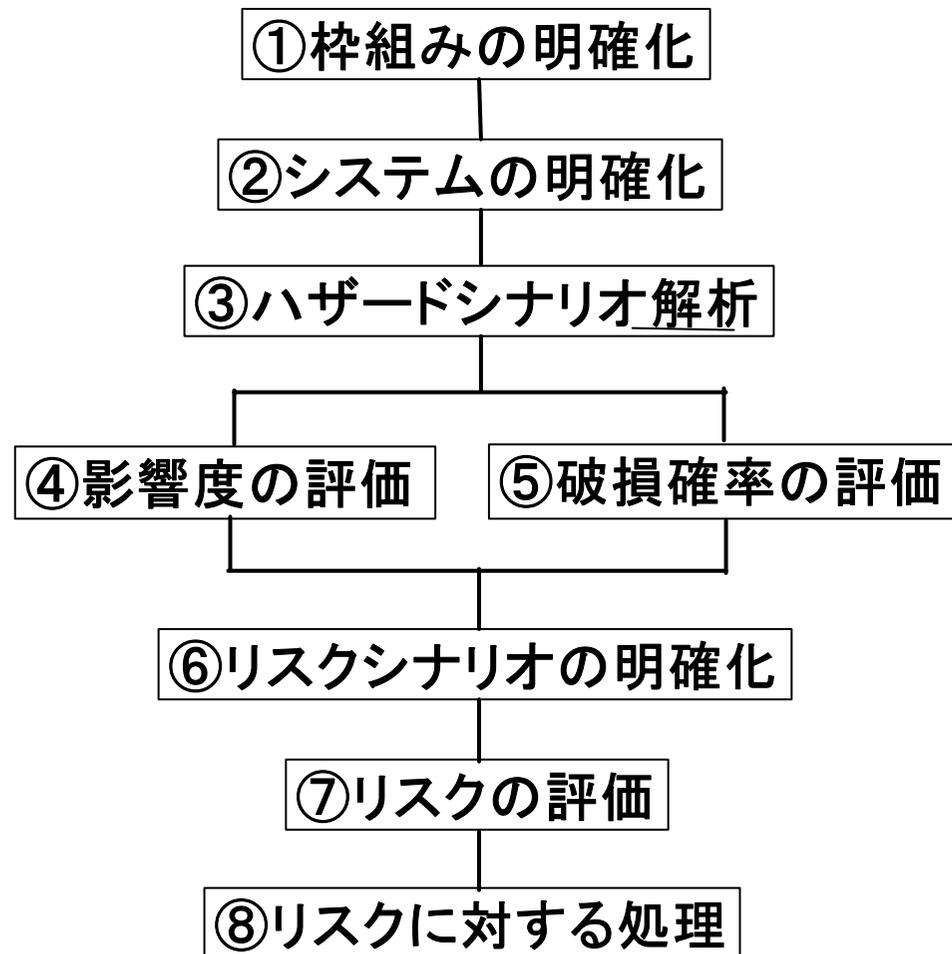
## 2. リスクマネージメントの概要

### ■ リスクマネージメント

損害、危害を最小の費用で効果的に処理するための経営管理手法

リスクマネジメント	
<b>リスクアセスメント</b> リスク分析 リスク因子の特定 リスク算定 リスク評価	リスク分析からリスク評価までのすべてのプロセス リスク因子の特定・リスク算定のための情報の分析 リスク因子を発見し、一覧表を作り、特徴づける リスクの発生確率と結果の値を設定 算定されたリスクを与えられたリスク基準と比較
<b>リスク対応</b> リスクの回避 リスクの最適化(低減) リスクの移転 リスクの保有	リスクを変更させるための方策の選択・実施プロセス リスクのある状況に巻き込まれないようにする 好ましくない結果及びその発生確率を最小化 損失の負担又は利益の恩恵を他者と共有 リスクからの損失の負担、又は利得の恩恵の受容
<b>リスクの受容</b>	リスクを受容する意思決定
<b>リスクコミュニケーション</b>	意思決定者と他の関係者間のリスクに関する情報の交換または共有

## ■ リスクアセスメントの手順



① リスク評価を行う範囲を明確に

② 評価対象とするシステムを明確に  
システムのモデル化

③ 異常事態で何が起きるかという  
シナリオを漏れなく抽出

④ 異常事態の結果生じる被害または  
影響度を特定

⑤ 異常事態が発生する確率を評価。  
損傷事例データの活用

⑥ 異常時に展開されるシナリオを  
明確に。FTAやETAなどの活用

⑦ リスクの基準を明確にし、影響度と  
破損確率の評価結果を用いてリスク  
評価を行い、リスク基準と比較

⑧ リスク評価とリスク基準の比較結果  
に基づきリスクに対する処理を決定

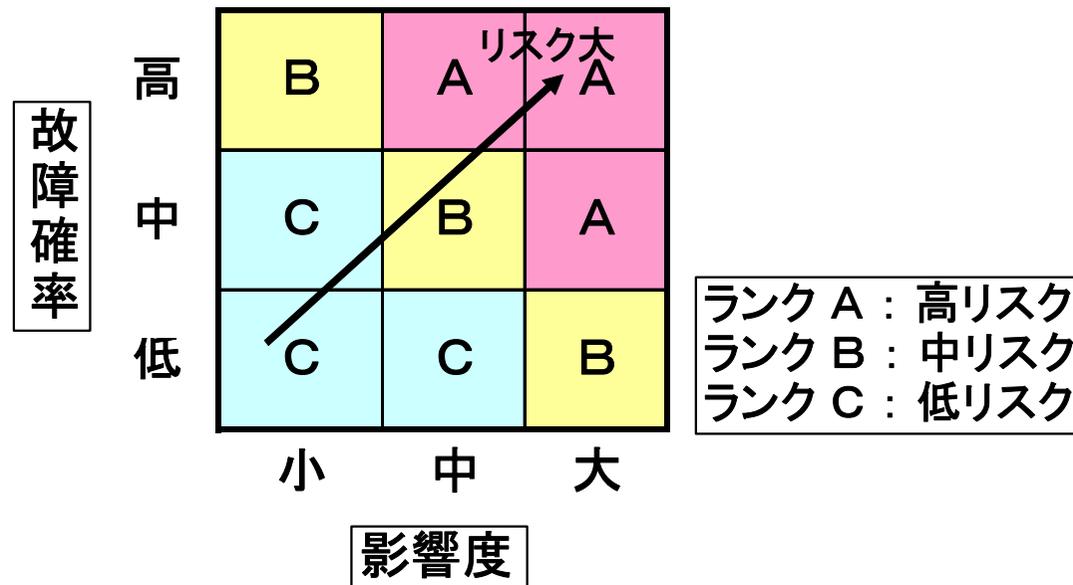
### 3. 技術社会におけるリスクマネジメント(安全工学)

#### ■ 工学におけるリスクの定義

故障確率(工学) × 影響度(社会と経済にも関連)

従来の安全性、信頼性に加えて、社会性と経済性をも包含した合理的な概念

リスクマトリックス



## 4. ものづくりにおけるリスクベース工学の適用

- (1) リスクベース設計
- (2) リスクベース製造
- (3) リスクベースメンテナンス RBM

これらの設計、製造、メンテナンスは相互に補完し合う一対の関係にある。

➡ **ライフサイクルエンジニアリング**

## (1) リスクベース設計

- ・設計の指標を、信頼度からリスクに置き換えたもの。
- ・設計は使用経験と加速試験のデータに基づく予測行為である。
- ・設計の基盤

Safe Life Design : 破損を許容しない設計(従来の設計)

Fail Safe Design : 破損を許容するが、メンテナンスで安全を確保する設計

- ・破損しないように設計したものが何故破損するのか？
  - ・材料の経年劣化
  - ・予期せぬ条件
    - 設計時の考慮不足(荷重、材料、計算精度)
    - 材料選定時のリスク
      - (同一規格材料は同一品質ではない、材料仕様の不備)
    - 製造時の不具合(溶接欠陥、鋳造欠陥、熱処理不適切など)
  - ・使用条件の変化(応力集中、腐食性物質の濃縮など)

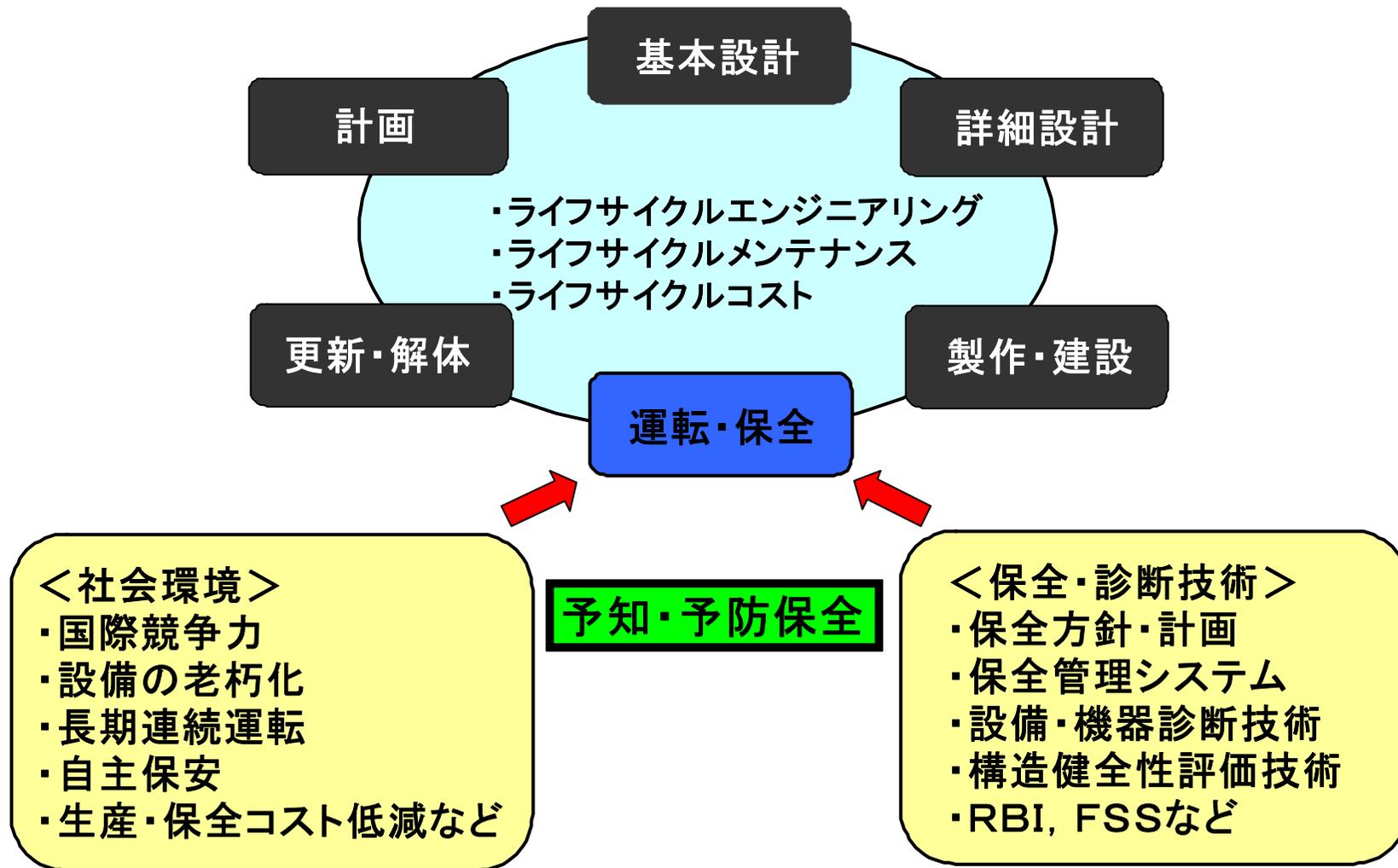


## (2) リスクベース製造

製造段階の信頼度は、安定度、不良度、不良率などで表示できる。  
この信頼度に影響度を考慮して、製造におけるリスクに置き換えて  
品質管理、品質保証を行う。

製造時の不具合（溶接欠陥、鋳造欠陥、熱処理不適切など）  
メンテナンスとしての補修時にも共通する。

### (3) リスクベースメンテナンス RBM



設備のライフサイクルと保全



## ■ リスクベースメンテナンスの3本柱

### ① リスクベース検査 RBI

破損確率と影響度の算定

リスクの評価

検査プログラムの選定

検査・診断

### ② リスクベース評価

検査結果の判定

構造健全性の評価

供用適正評価 (FFS)

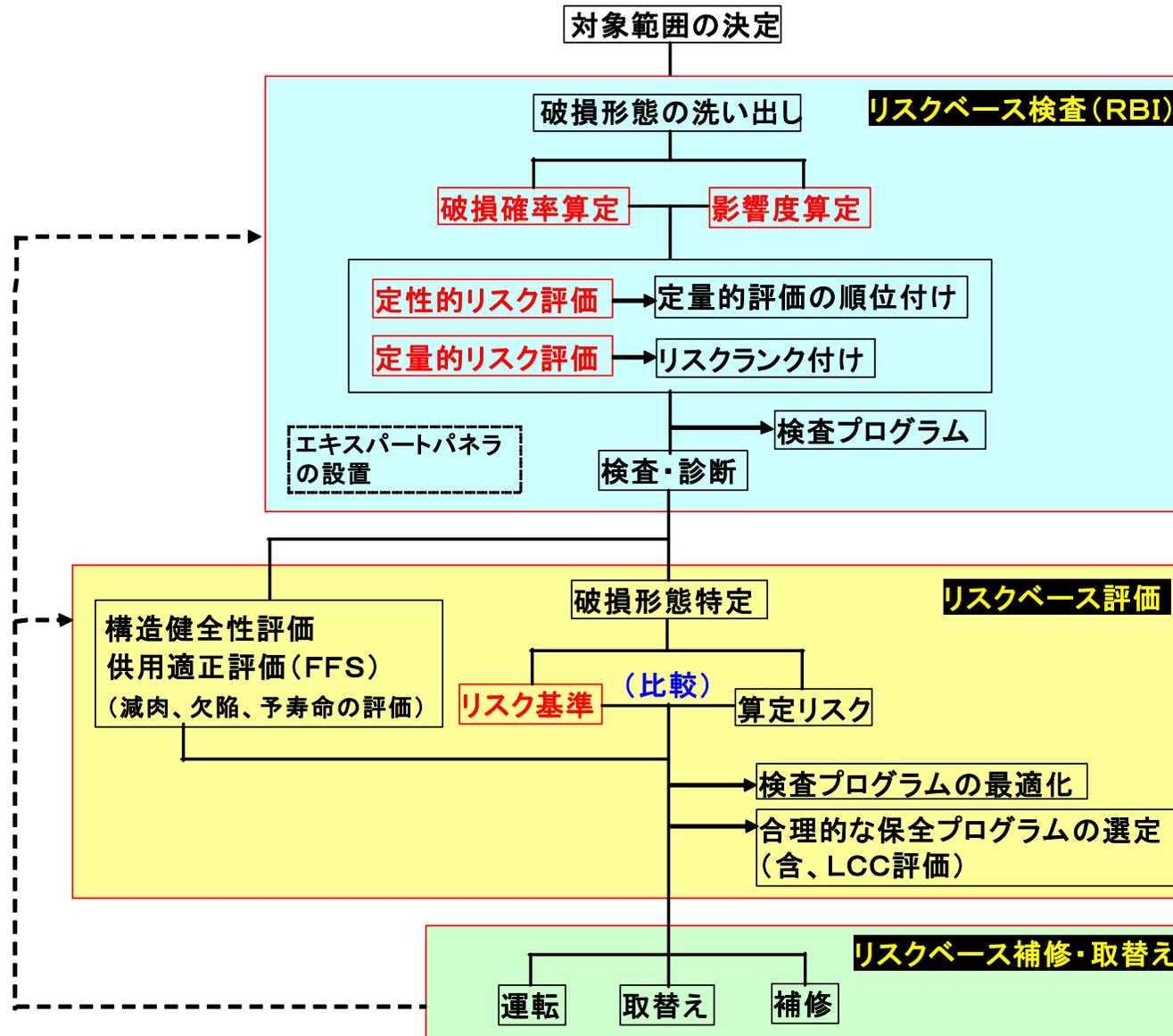
検査プログラムの最適化

合理的な保全計画の策定  
(LCC評価を含む)

### ③ リスクベース補修・取替え

補修・取替えプログラムの選定

# ■ リスクベースメンテナンスの例



(関連技術/資料)

<テクニカルモジュール>  
API 581  
HPI RBIハンドブック  
FTA、ETA  
確率統計論

非破壊検査技術  
(RT, MT, 超音波など)

材料・構造物の劣化/破損形態

<FFS>

API RP579  
API/ASME STP579

HPIS Z101  
破壊力学 材料力学、FEM

加工技術  
(溶接、鋳造、鍛造、機械加工)

## < 損傷確率と影響度 >

リスク = 事故・故障の発生確率 × 事故・故障の影響度

発生確率：事象が起こりそうな程度

影響度：事故・故障によって発生する災害に影響を及ぼすリスクレベル

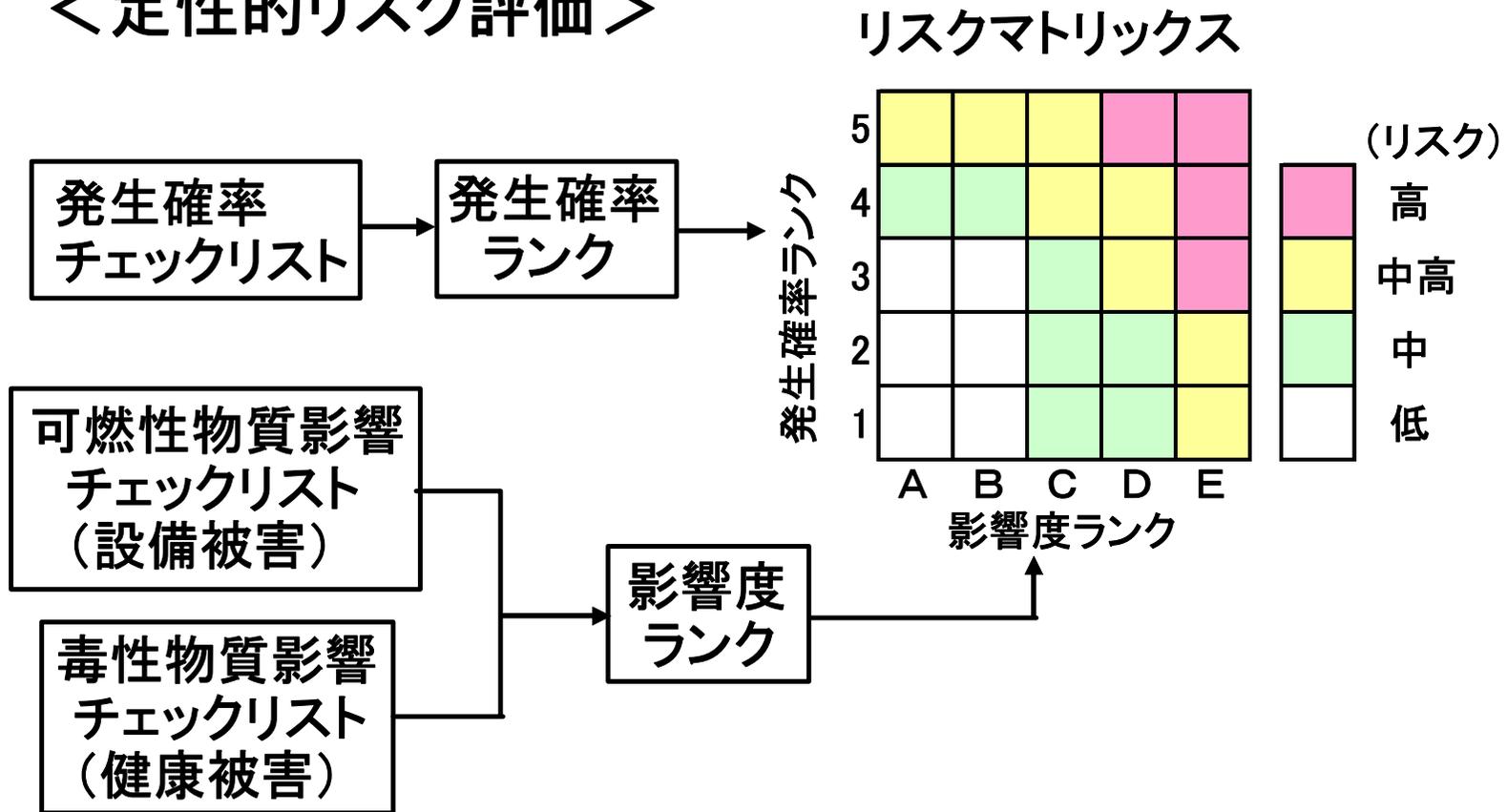
影響度の分類の例：

- ・人体への安全に対する災害
- ・周辺環境への被害(含、復旧費用)
- ・コスト面の損失(設備損壊、事業中断など)

システム／機器の種類により；

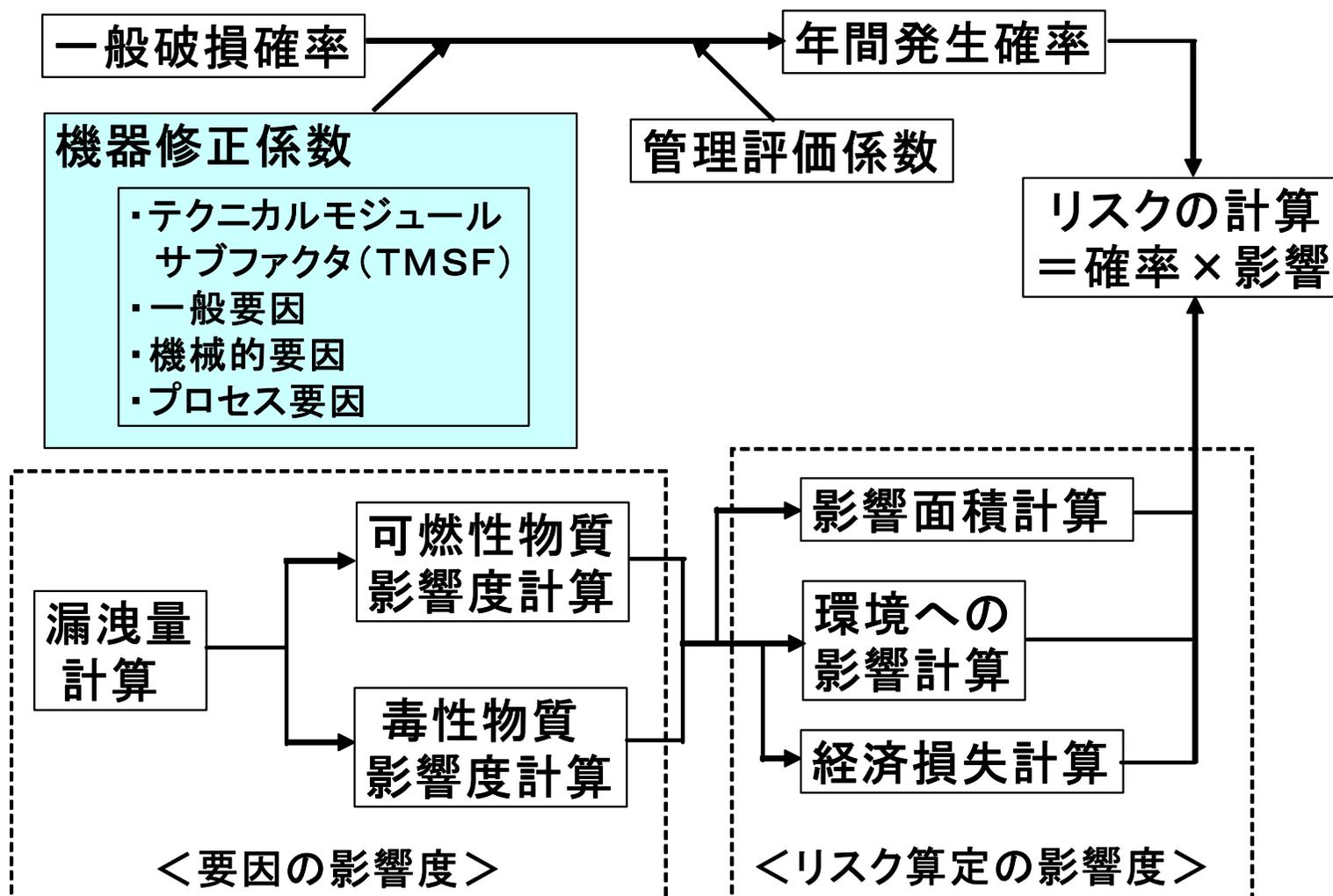
- ・規格、基準で設定
- ・各社の合理的判断で設定

## <定性的リスク評価>



- 機器毎の運転条件やプロセス流体条件等から想定される災害を特定
- 専門家や現場実務者の知識・経験を基に
- 主観に基づくリスクのランク付け手法(各社の合理的判断)

## < 定量的リスク評価 >



## ■ テクニカルモジュールとは・・・

リスクの評価における破損発生確率と破損影響度を評価し、リスクを推定する手順を**具体的損傷について**示したもの

減肉	塩酸、高温硫化、高温硫化水素 硫酸、弗酸、アミン、高温酸化
応力腐食割れ	苛性、アミン、硫化水素、炭酸、ポリチオン酸 塩素、水素脆化
高温水素浸食	高温水素浸食
炉管破損	長期クリープ、短期クリープ
配管の疲労	機械的振動による疲労
脆性破壊	低温脆化、焼戻し脆化、475脆化、シグマ脆化
ライニング破損	肉盛、コーティング、耐火物、ガラス、モルタル
外面損傷	外面減肉、外面応力腐食割れ、断熱材下腐食

## ( 機器修正係数 )

技術要因 TMSF	一般要因	機械的要因	プロセス要因
1~5000	-1~9	-6~17	-5.5~15.5
劣化速度	プラント状態	機器の複雑度	連続運転性
検査の有効性	寒冷気候	配管の複雑度	安定性
	地震活動度	寿命消費度	安全弁管理
		運転余裕度	(保全計画)
		振動監視	(流体の腐食性)

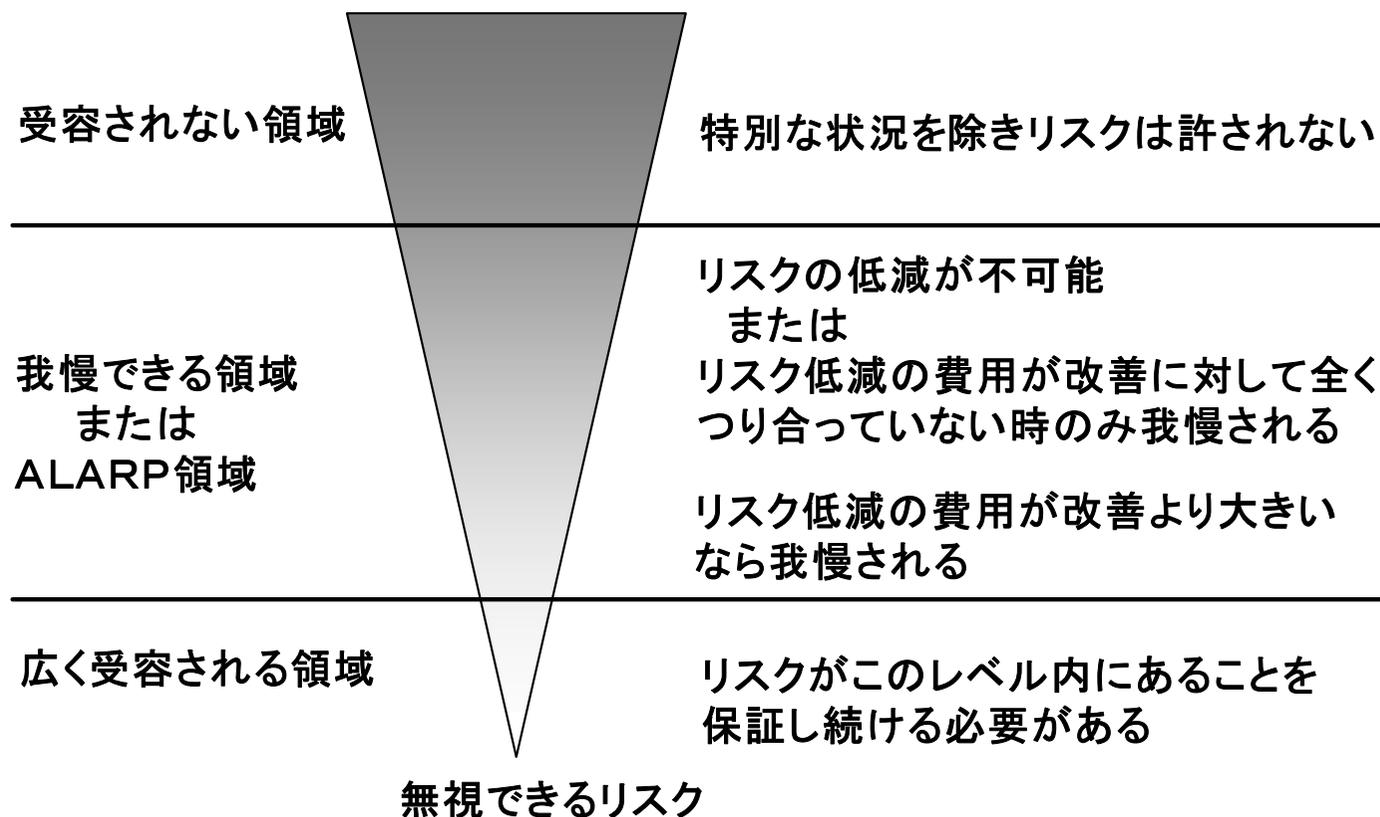
( 管理評価係数 ) 0.1~15.5

**発生確率 = 一般発生確率 × 機器修正係数 × 管理評価係数**



## ALARPの原則 (As Low as Reasonably Practicable)

リスクを実行可能な範囲内で出来るだけ低減しなければならない



リスクがゼロでなくても、それが広く受容れ可能ならば「安全」として認める

## 5. リスクエンジニアリング関連規格の動向(非原子力分野)

### 国外における動き

- 米国 : API(米国石油学会)、ASME(米国機械学会)が  
RBIガイドライン
- 欧州 : RIMAPガイドライン(汎用規格化)

### 日本における取り組み

HPI(高圧力技術協会)

RBM専門研究委員会

- ・RBMガイドラインの開発中(~2007)
- ・RBMハンドブックの作成中(~2007)

「圧力設備診断技術者(レベル1 & 2)認証制度」

JRCM 産学金連携センター

経済産業省／産学連携製造中核人材育成事業:

「機械構造物のリスクマネジメント能力を持った保全  
技術者の育成」プログラムの開発(~2007)



## 6. 最後に（個人的感想）

- ・今後、リスクベースエンジニアリングはRBM／RBIを中心に適用が広がってゆくものと予想される。
- ・RBM／RBIの評価システム（骨組みや手順）は国内外のガイドラインの開発によって確立されつつある。
- ・今後は、個々の評価要素、各種データベース（損傷事例や材料劣化）、適用事例の拡充が望まれる。
- ・リスクベースマネジメントを活用できる技術者の育成が必要。
- ・そのためにも、大学教育においてリスクベースエンジニアリングの専門教育が望まれる。