

図1-3 2次主冷却系ナトリウム漏えい事故 原因究明調査の流れ

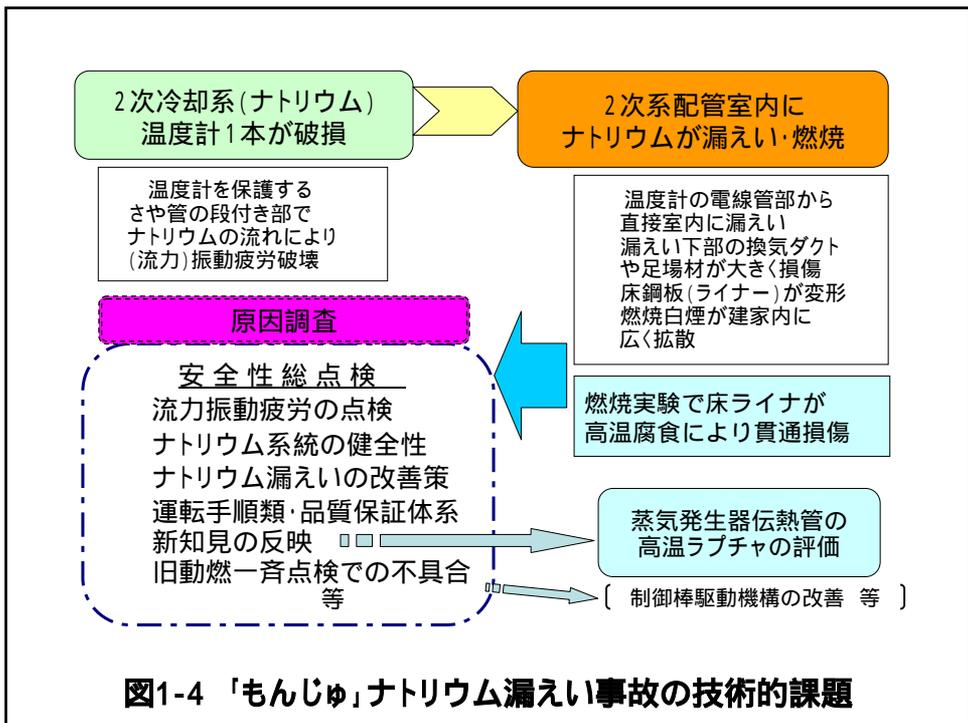
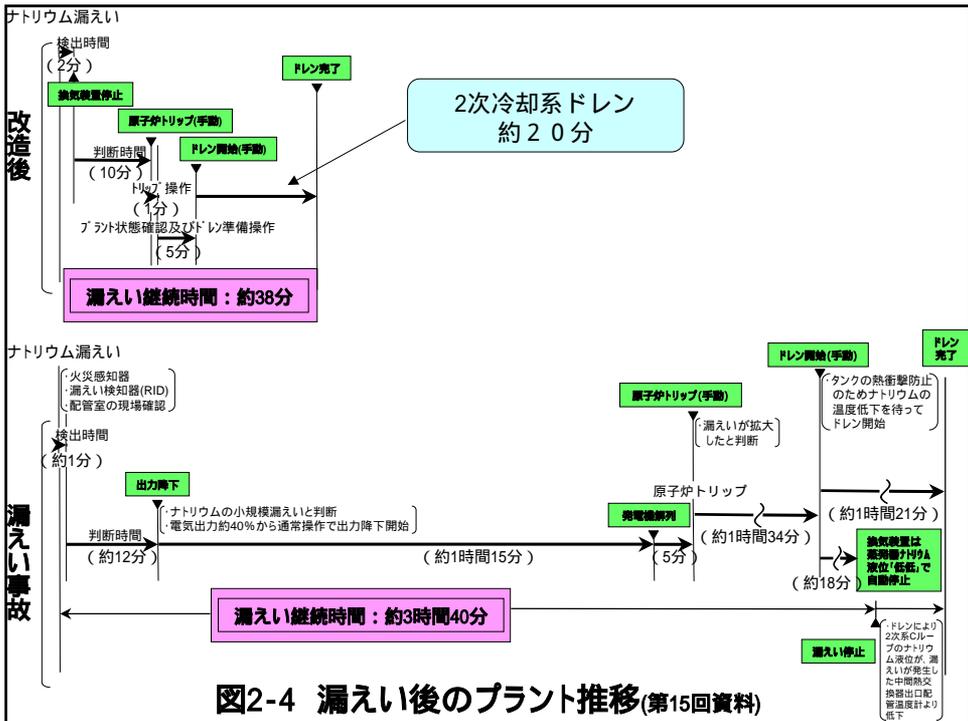
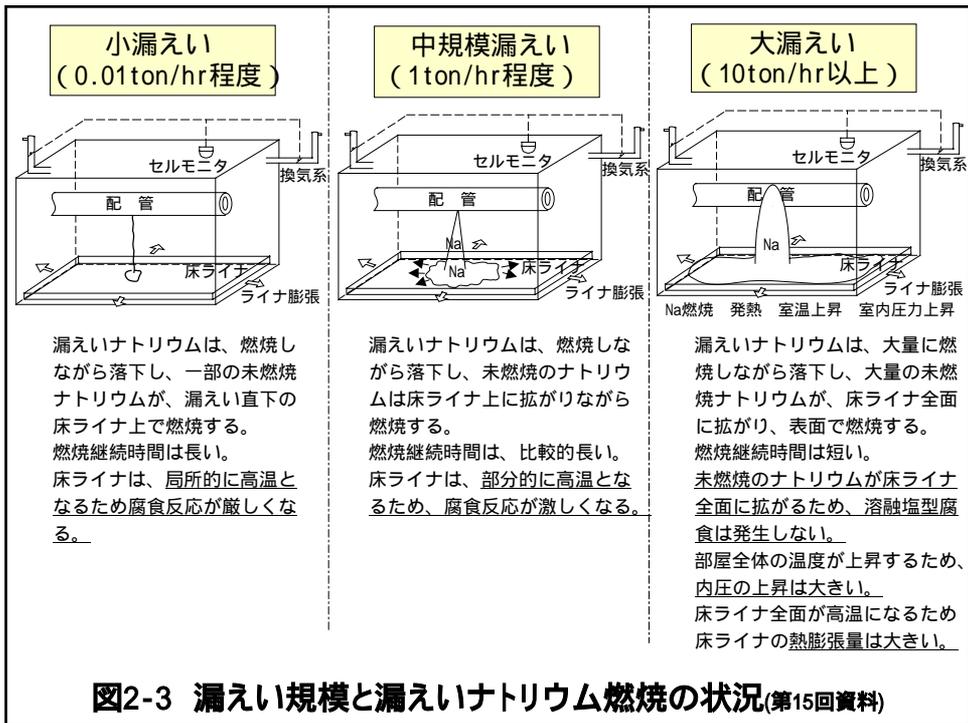
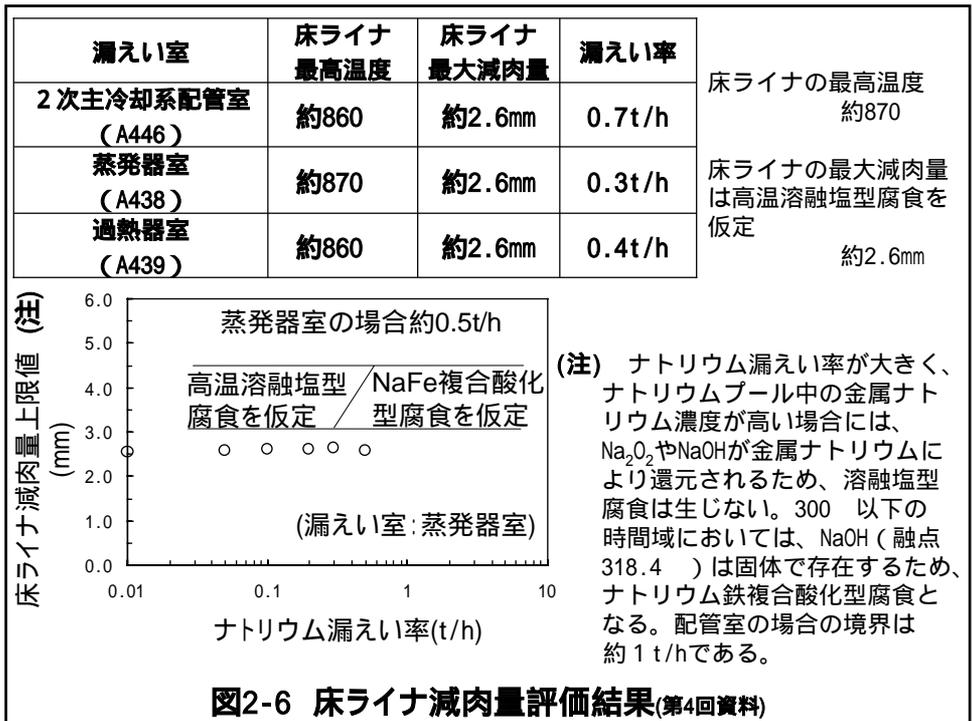
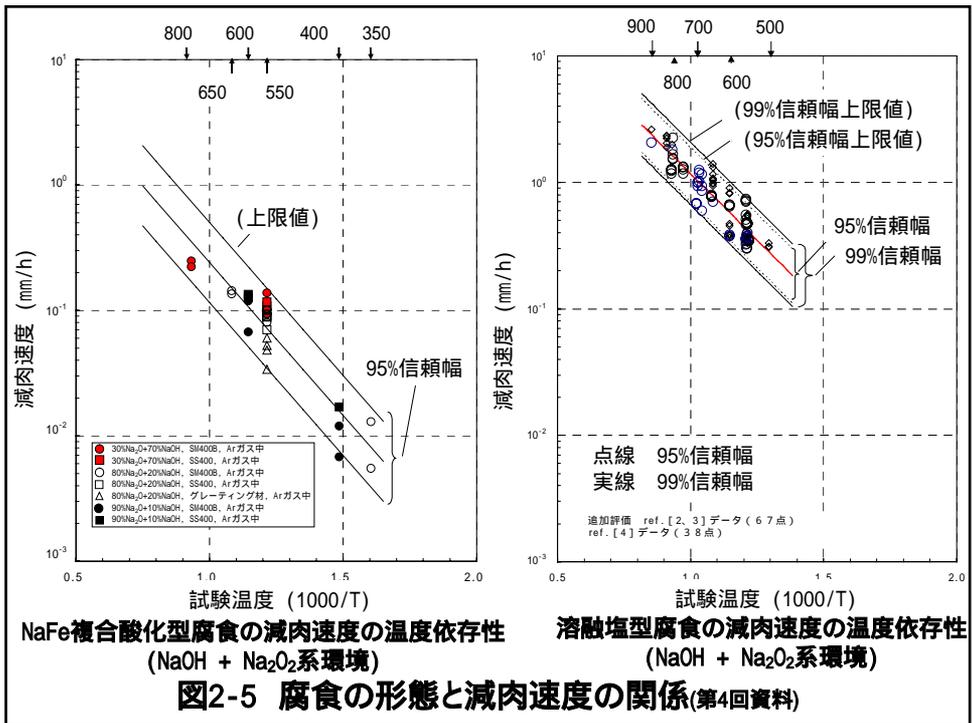


図1-4 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故の技術的課題





| | 容積 | 漏えい量 | 換気流量 | 換気の特徴 | 雰囲気ガス温度 | 壁コンクリート温度 | 床ライナ最高温度 | 堆積物のNaOH生成に寄与する水分 | 腐食 |
|----------|-------------------------------|--------------|---|------------------|---------------------|-----------------|--------------|-------------------|----------------|
| もんじゅ事故 | 2300m ³ (30ガット) | 640±4 2kg | 390m ³ /分 | 強制換気 | 漏えい部を除き 40~50と推定 | 漏えい部近傍を除き 40 | 約700~ 750 | 殆どなしと推定 | 約1~ 1.5mm減肉 |
| 漏えい燃焼実験- | 100m ³ (鋼製) | 240kg | 35m ³ /分 (うちカメラ約 0.7m ³ /分) | 強制換気 | 約320 | 100以上 | 約770 | 殆どなし | 約1mm減肉 |
| 漏えい燃焼実験- | 170m ³ (30ガット) | 690kg | 35m ³ /分 (うちカメラ約 31m ³ /分) | カメラからの 強制吹き付け | 約300 | 100以上 | 約850 | 約80kg | 6カ所 (貫通孔) |

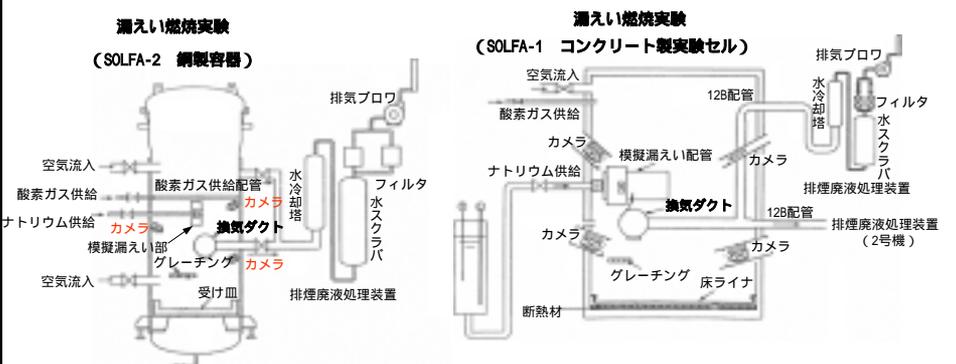


図2-7 もんじゅナトリウム漏えい事故と漏えい燃焼実験(第15回資料)

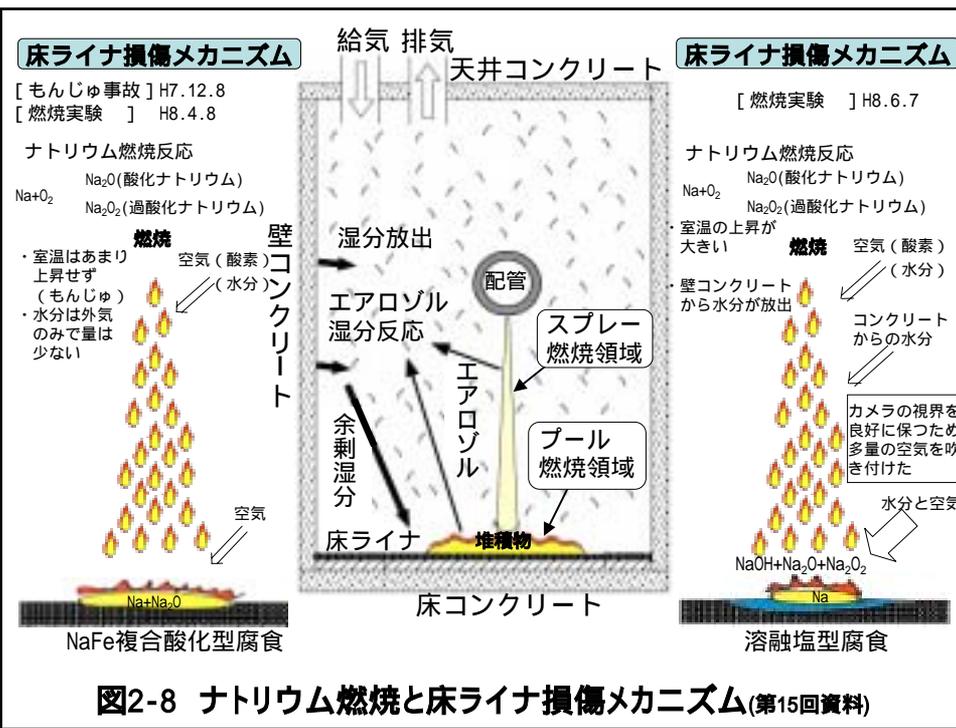
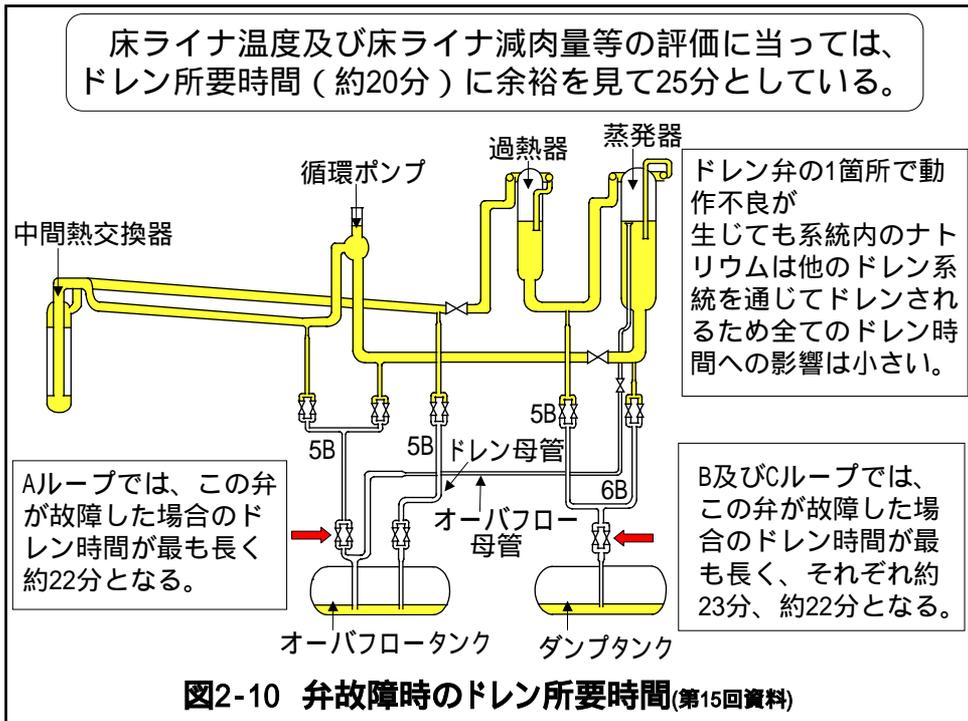
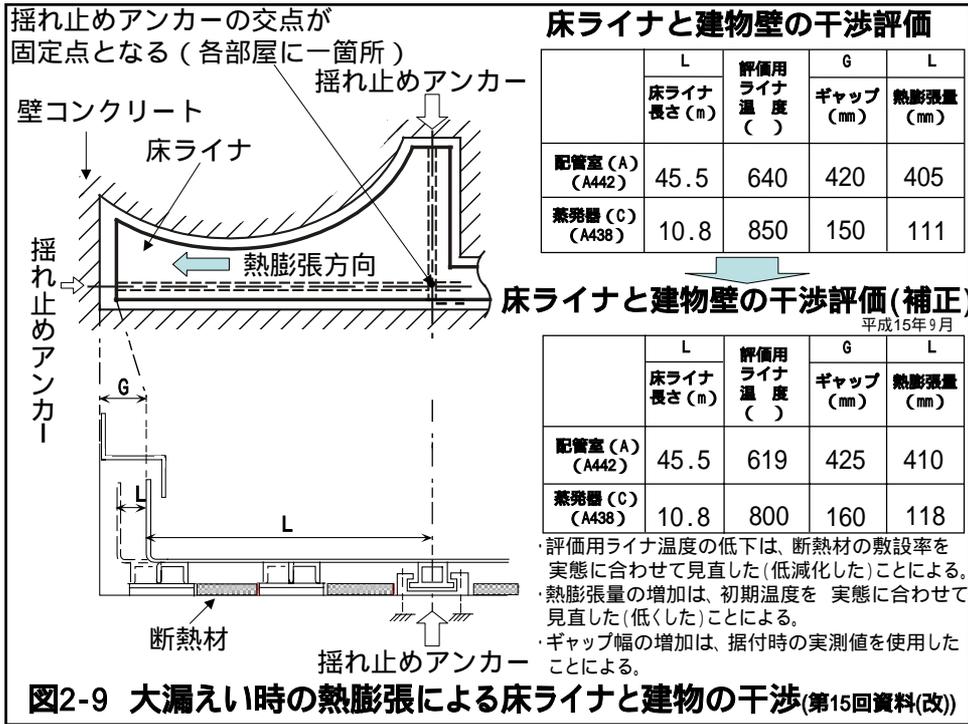
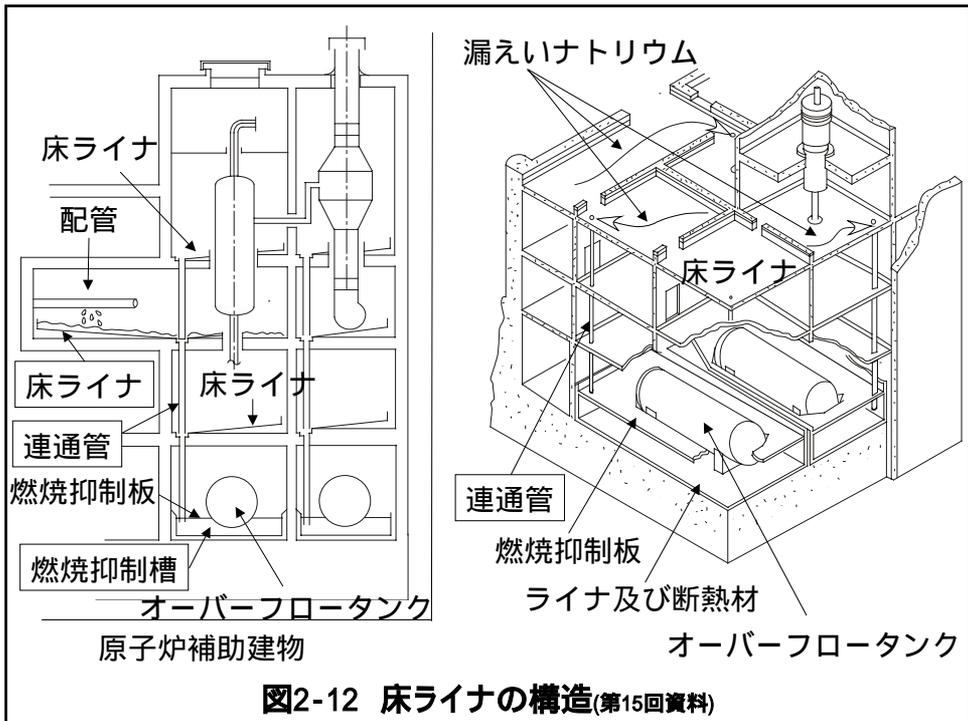
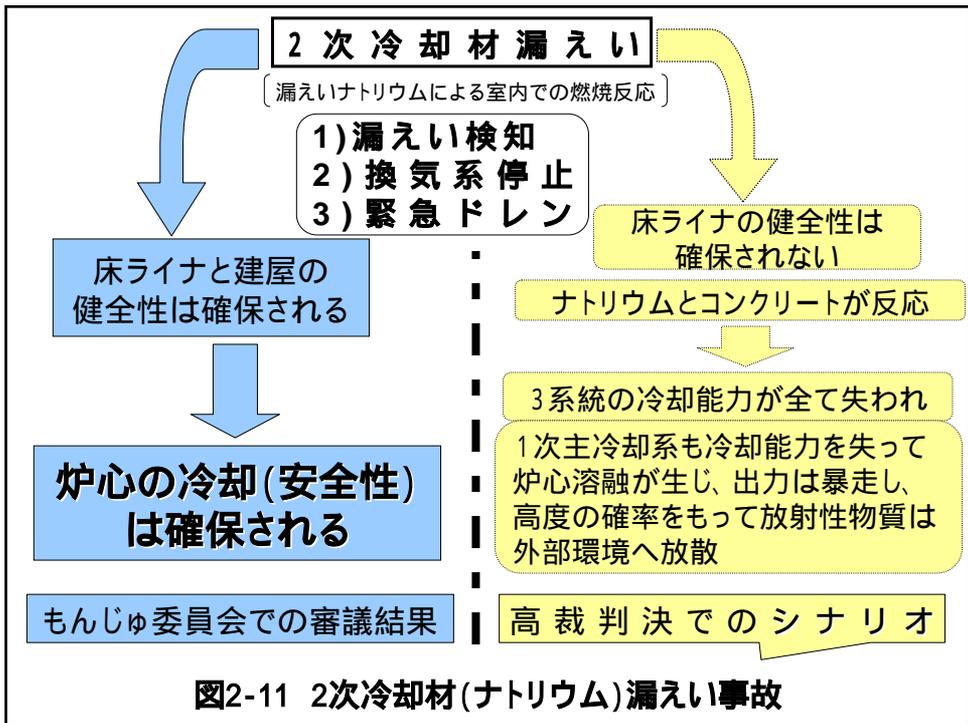


図2-8 ナトリウム燃焼と床ライナ損傷メカニズム(第15回資料)





室内へのナトリウム漏えいの検知は确实

- ・配管外面(保温材内)でのナトリウム漏えい検知器
- ・室内のセルモニタ(煙感知器・熱感知器)
- ・TVモニタ 火災感知器 により确实に検知可能

漏えいナトリウムの燃焼を早期に抑制できる

- 1) 漏えい検知で換気系は自動停止 酸素の供給を遮断
- 2) 漏えい確認後、緊急ドレン開始 漏えい量を抑制

漏えい検知後、遅くとも約1時間以内で燃焼は停止

漏えいナトリウムが燃焼しても、床ライナの健全性と建屋の健全性は十分確保される

- ・壁、天井部に断熱構造を採用 湿分の放出抑制 (急速な腐食反応を防止)

- 1) 急速な腐食反応を考慮しても、床ライナの最大減肉量は厚みの約半分程度
- 2) 熱膨張が生じても、床ライナが建屋壁と接することはない
- 3) 建屋内の内圧が上昇しても、建屋が壊れることはない

図2-13 2次冷却材漏えいに対する改善策の効果

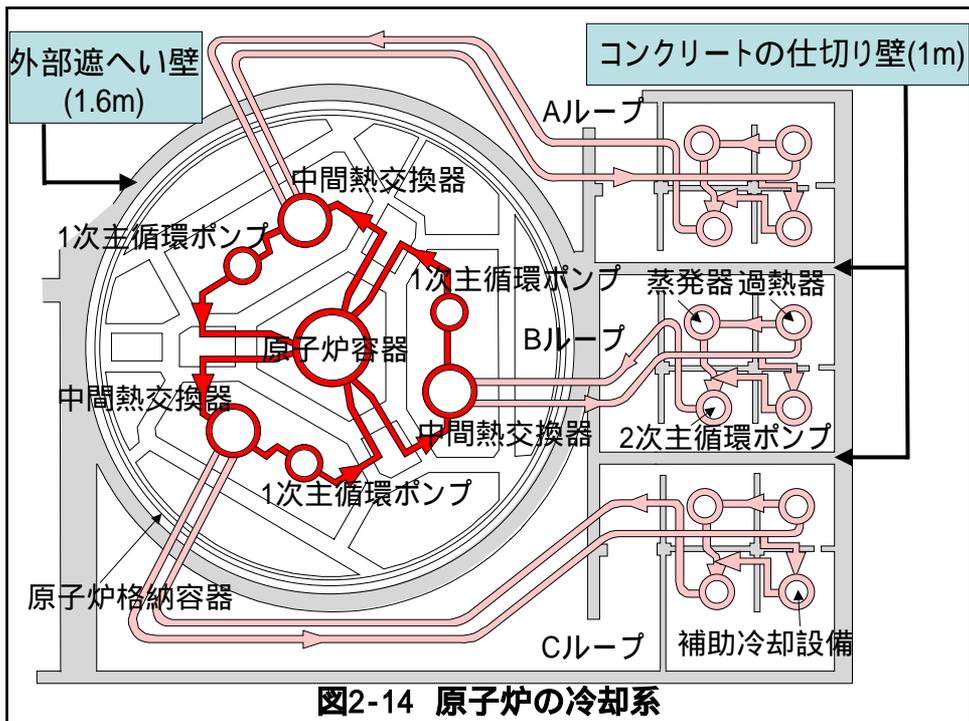


図2-14 原子炉の冷却系

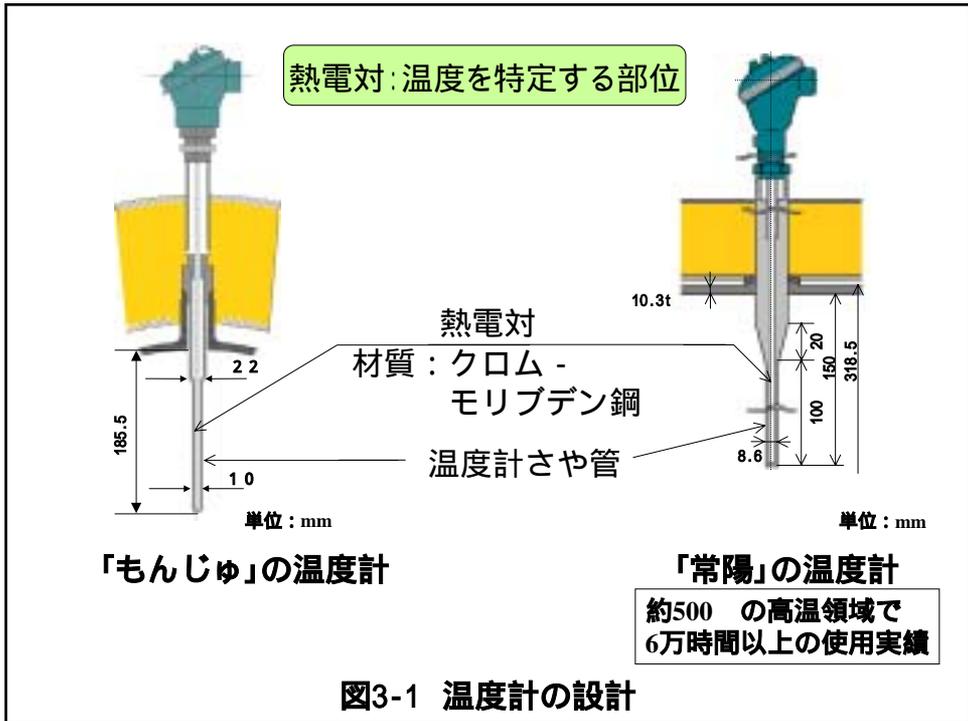
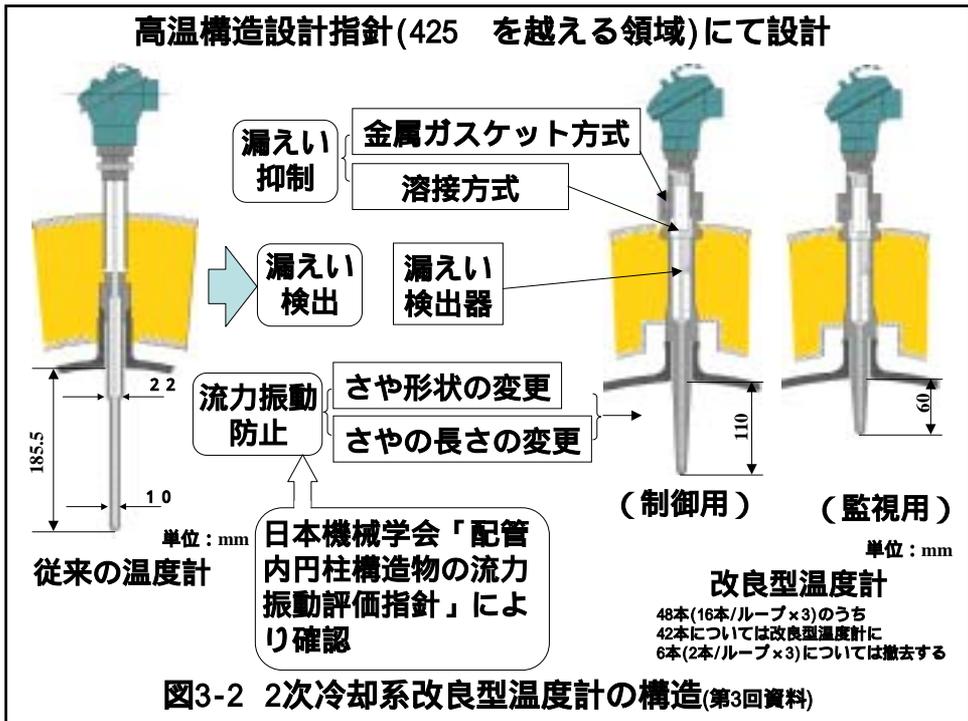


図3-1 温度計の設計



| | 液体金属 | | | | 気体 | 備考 | |
|---|------------------|---------------|------|------|--------------|----------------------|------|
| | ナトリウム | ナトリウム・カリウム | 水銀 | 鉛 | ヘリウム | 水 | |
| 融点 () | 98 | カリウム | 39 | 328 | - | 0 | |
| 沸点 () | 881 | 784 | 357 | 1737 | - | 100 | |
| 熱流力特性 | 代表条件 | 327 | 327 | 277 | 10MPa 327 | 15MPa 327 | |
| | 比重 (-) | 0.87 | 0.80 | 12.9 | 10.6 | 7.9×10^{-3} | 0.66 |
| | 熱伝導率 (w/cm・k) | 76 | 26 | 13 | 16 | 0.25 | 0.50 |
| 中性子減速能 | 小 | 小 | 小 | 小 | 小 | 大 | |
| 中性子吸収断面積 (10^{-6}cm^{-1}) | 小 | 小 | 小 | 大 | 小 | 小 | |
| | 5 | 28 | 430 | 32 | 0 | 2 | |
| 化学的活性 | 大 | ナトリウム 以上に大 | 小 | 小 | 小 | 小 | |

伝熱流動特性値；伝熱工学資料（改定第4版）、日本機械学会（1986年）
NAKAGAWA, Ed, JAPANESE EVALUATED NUCLEAR DATA LIBRARY Ver3, JAERI (July, 1990) 原子力ハンドブック、オーム社

図4-1 各種冷却材の特性(第9回資料)

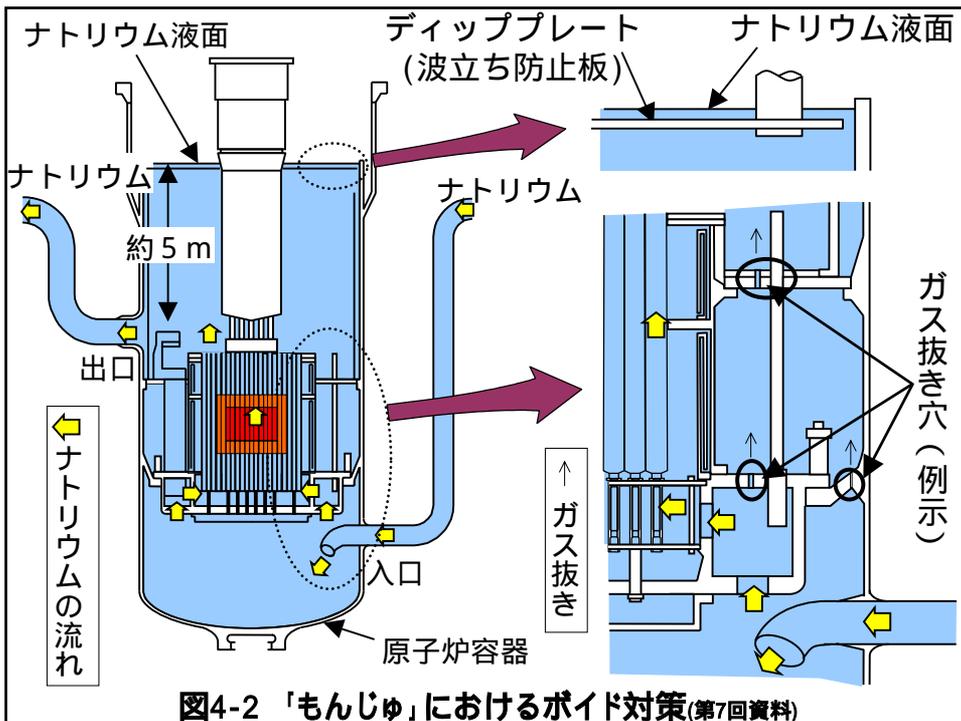
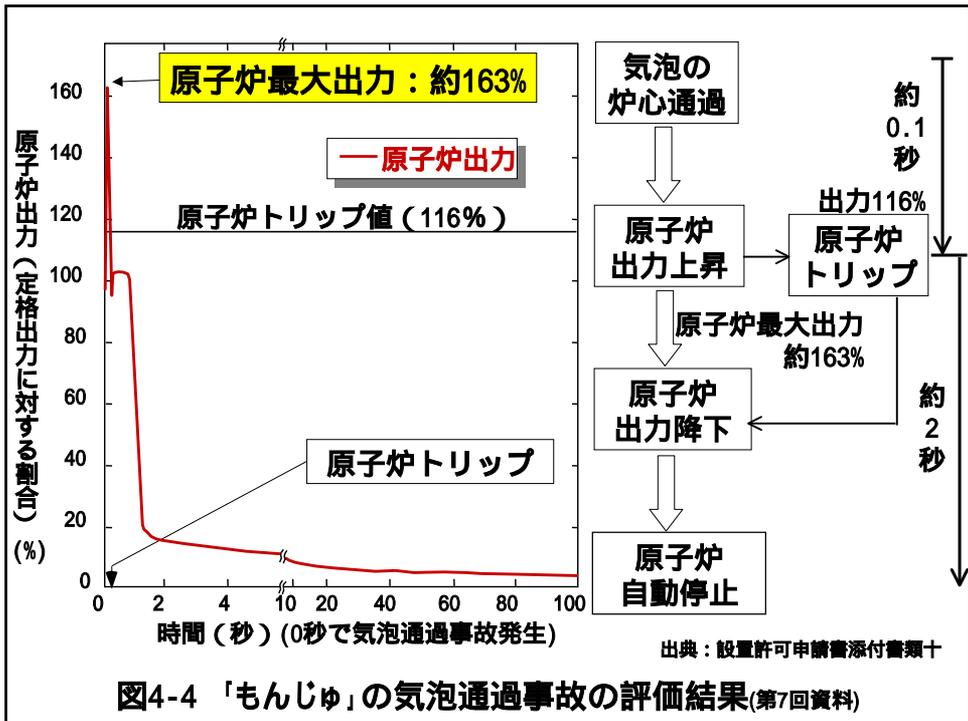
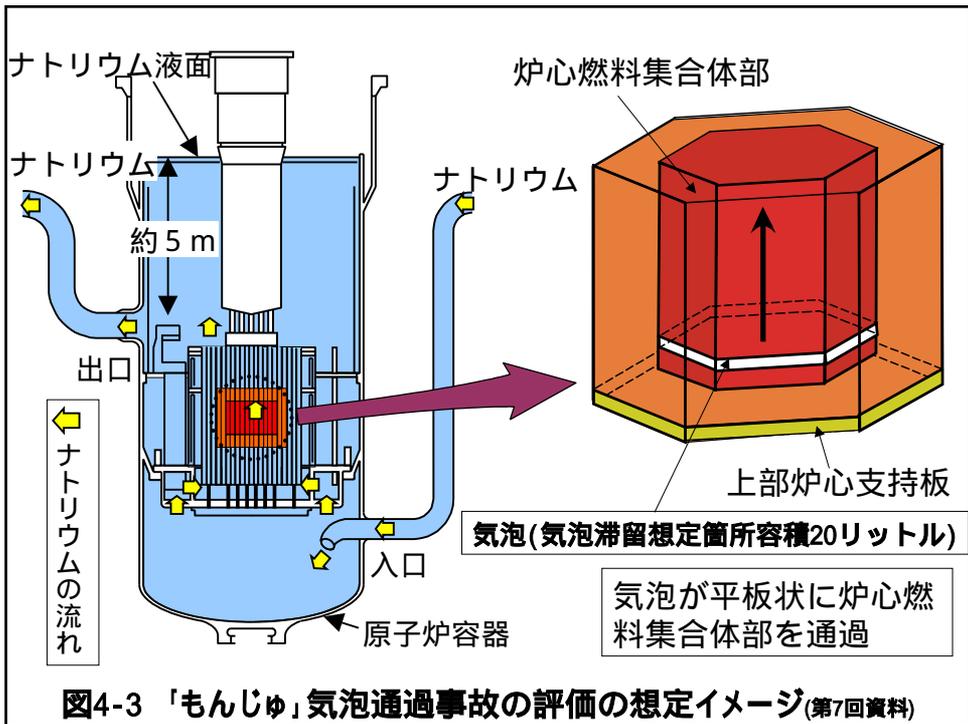
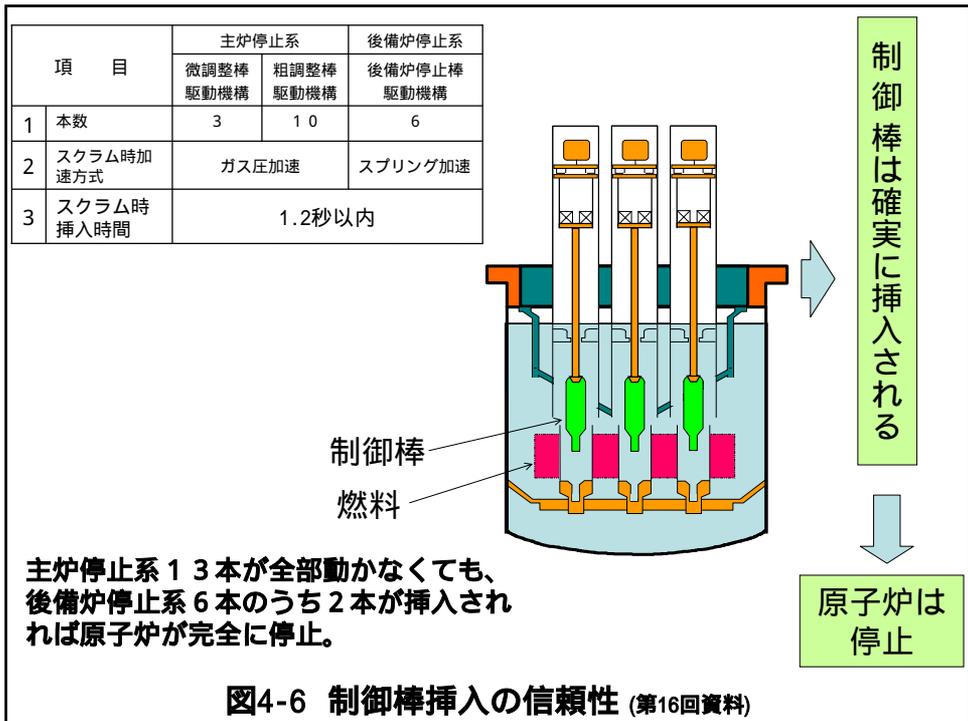
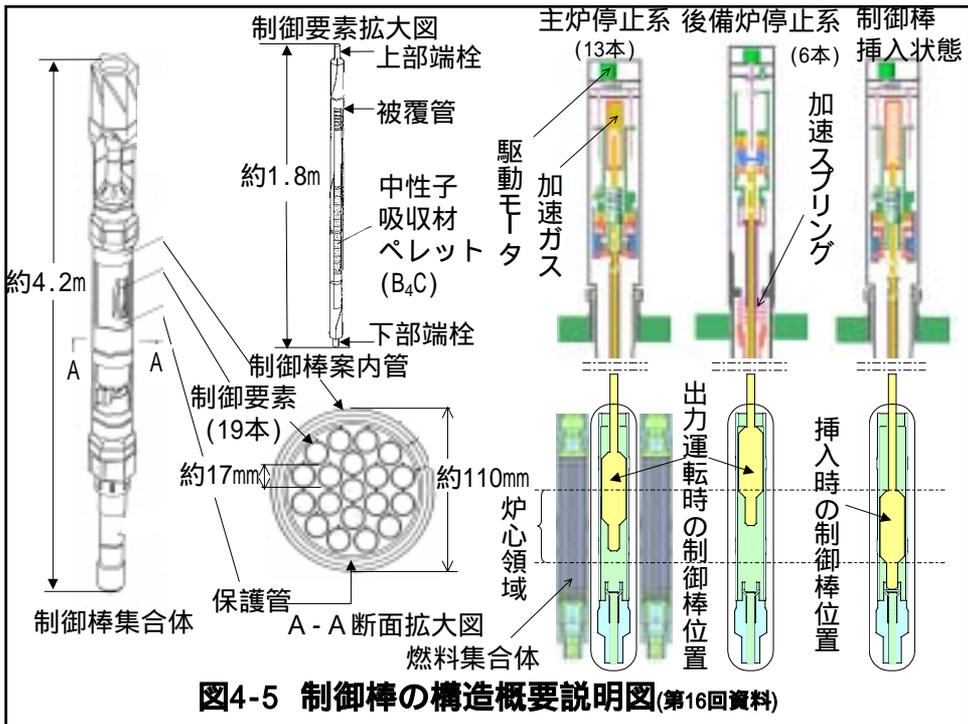
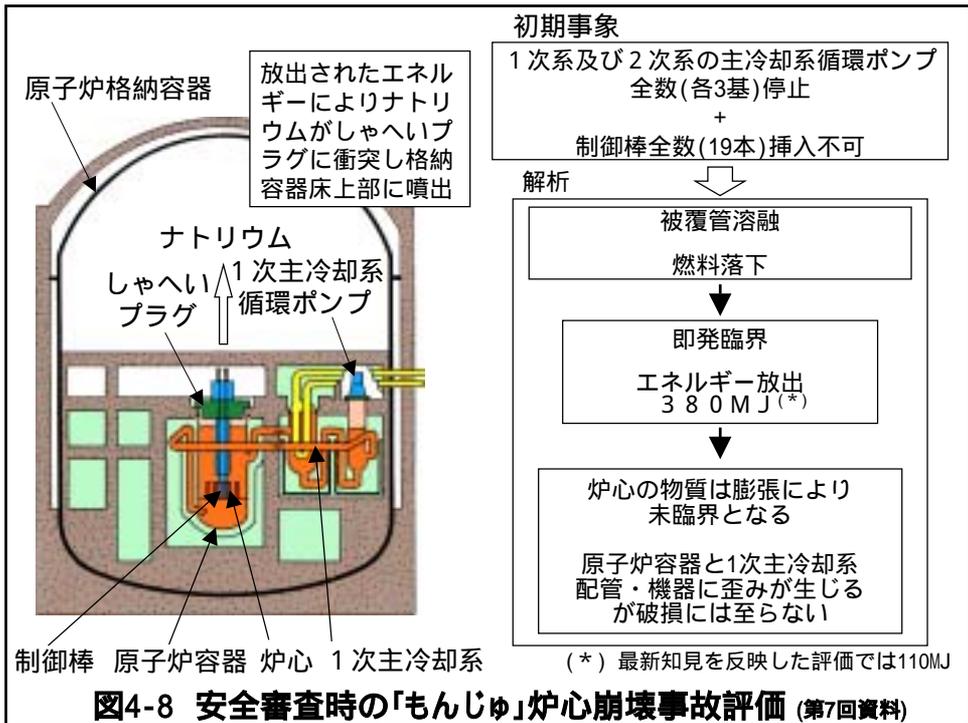
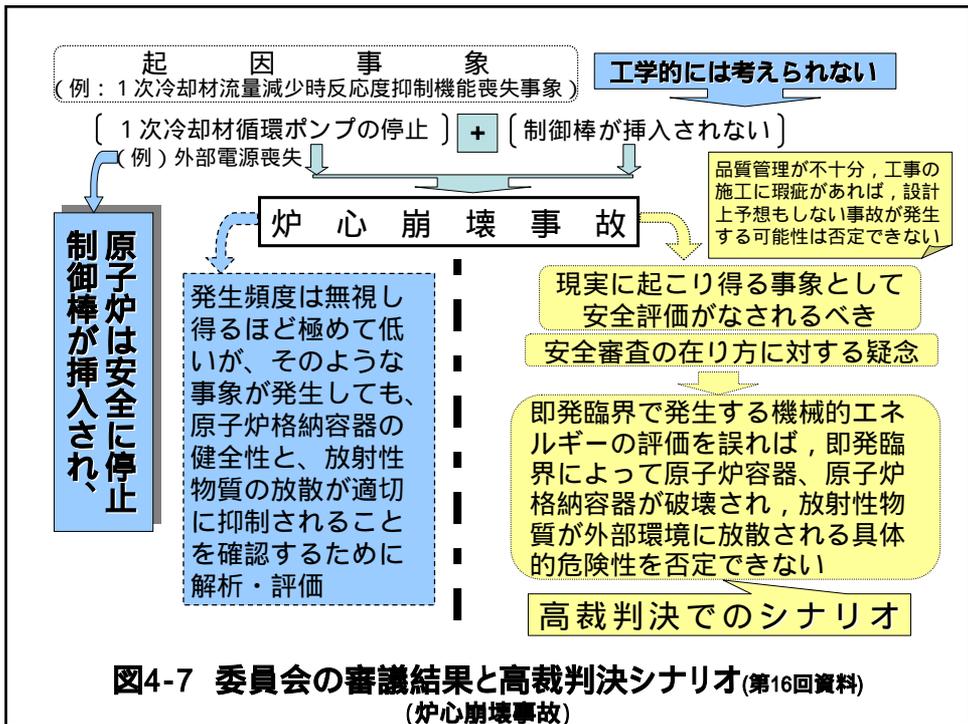
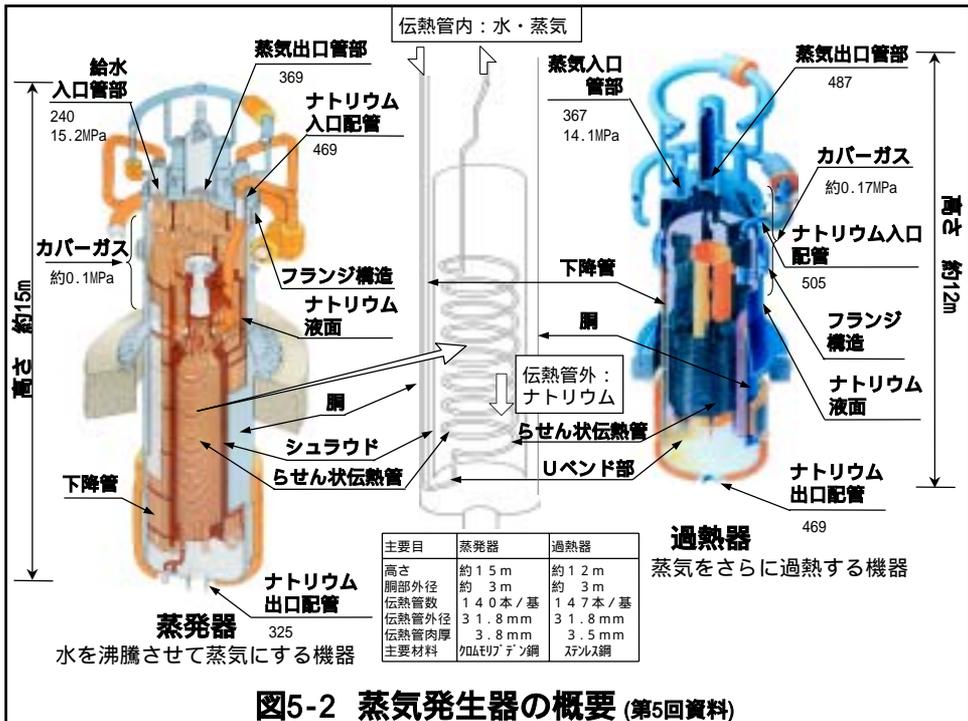
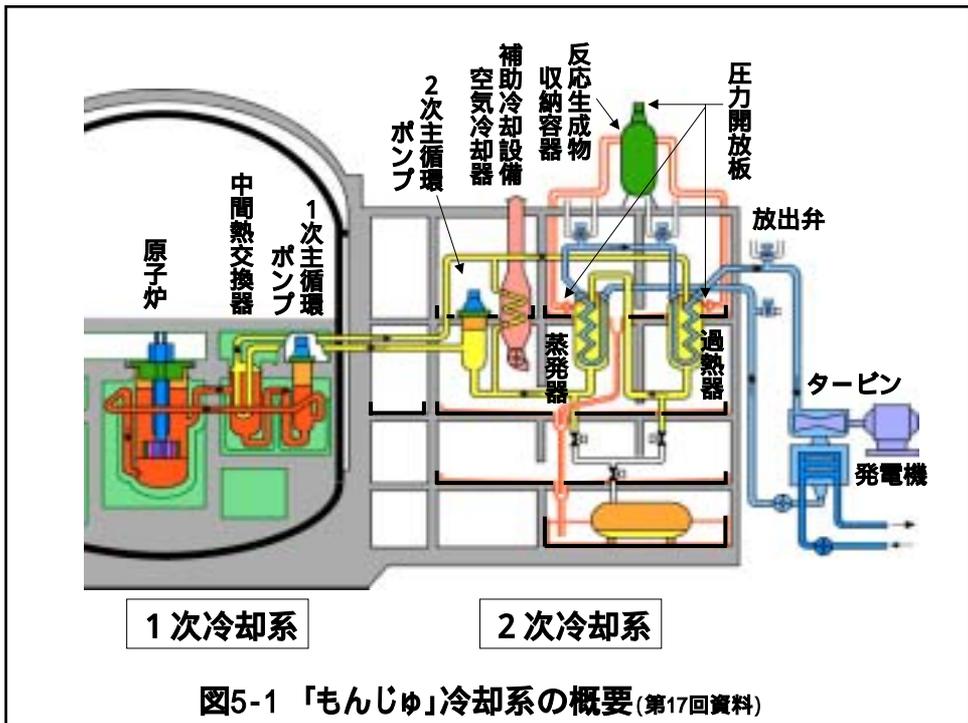


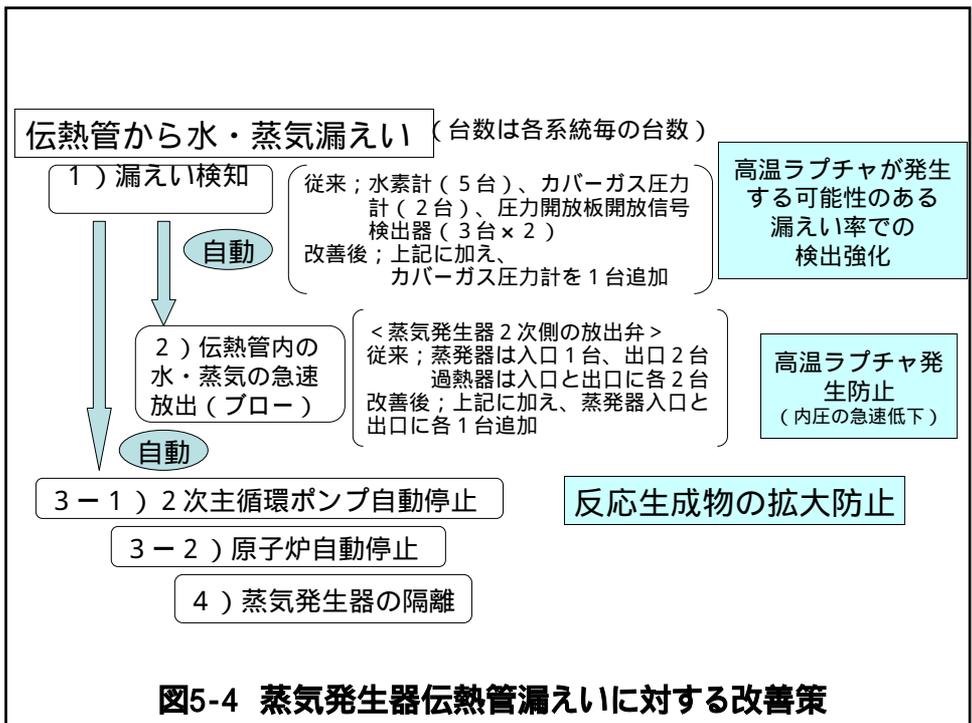
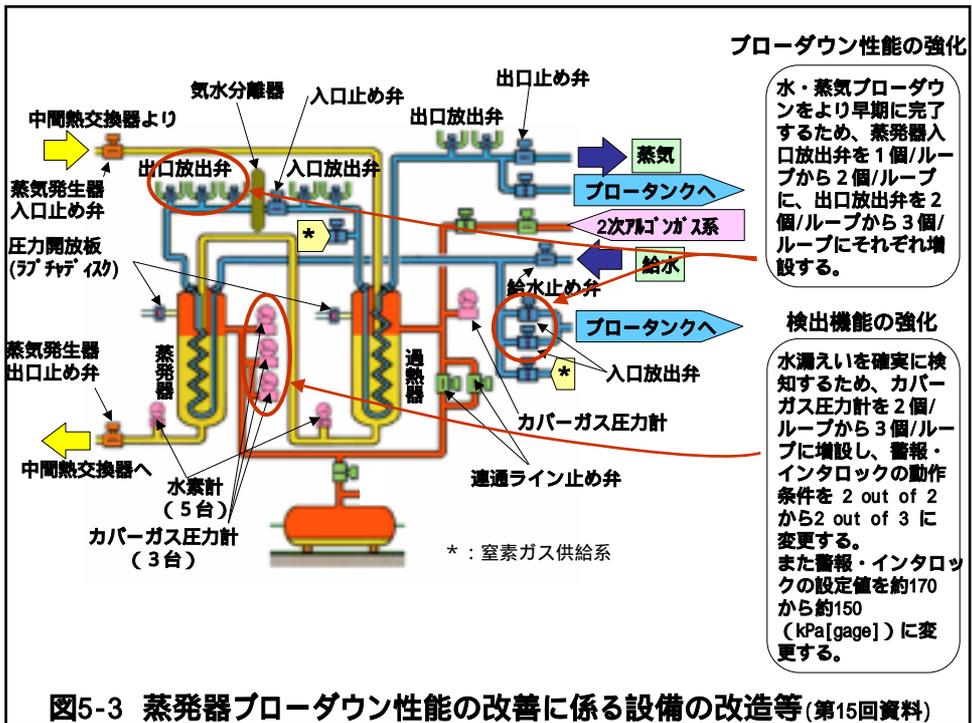
図4-2 「もんじゅ」におけるボイド対策(第7回資料)











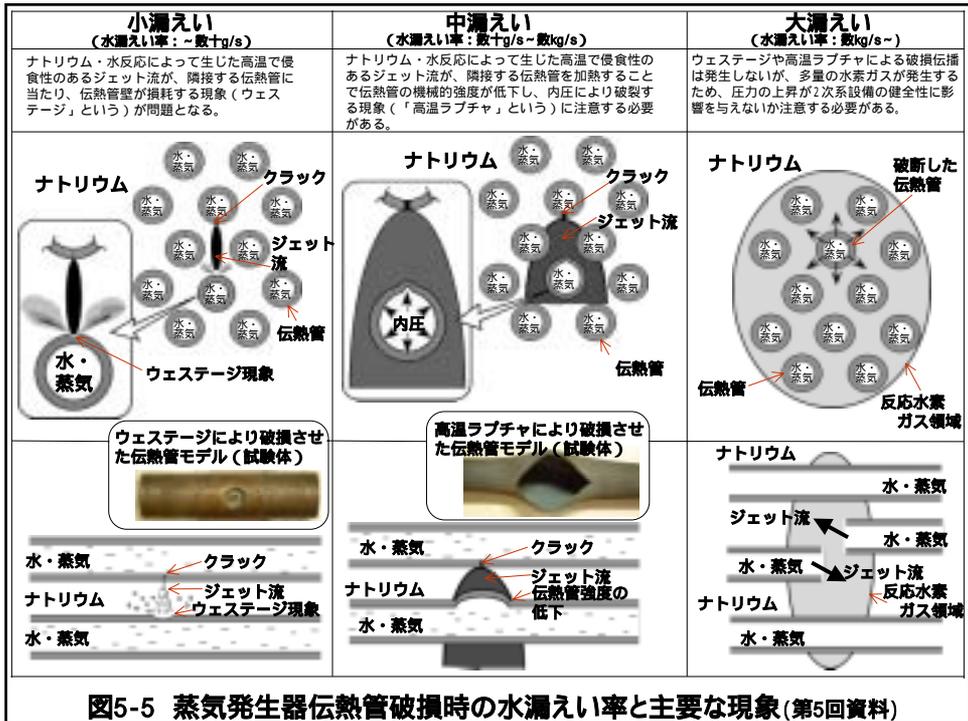


図5-5 蒸気発生器伝熱管破損時の水漏れ率と主要な現象(第5回資料)

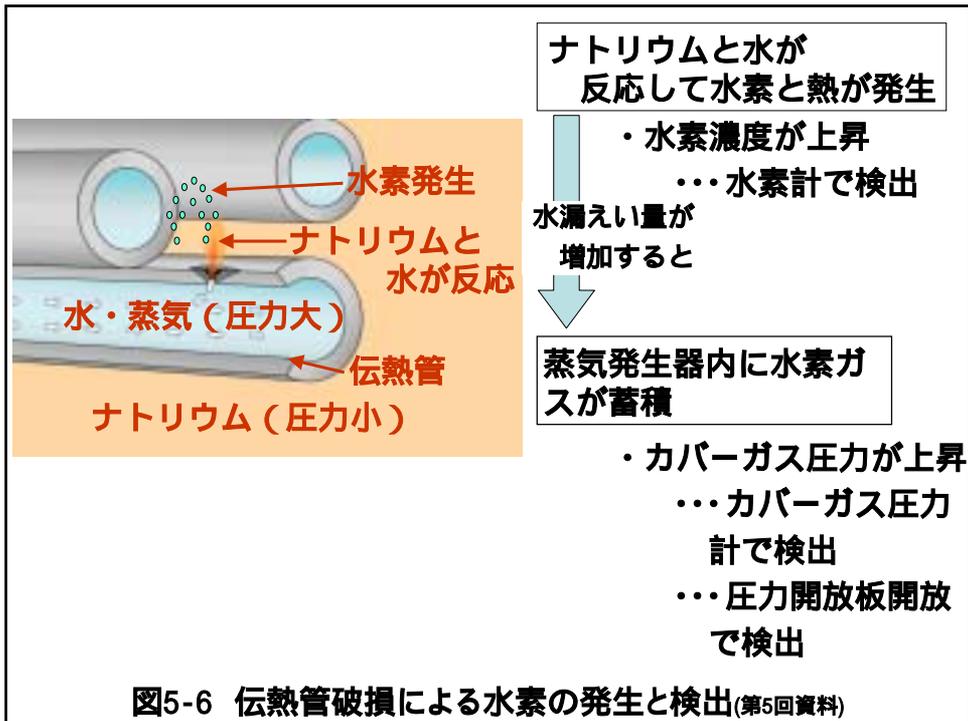
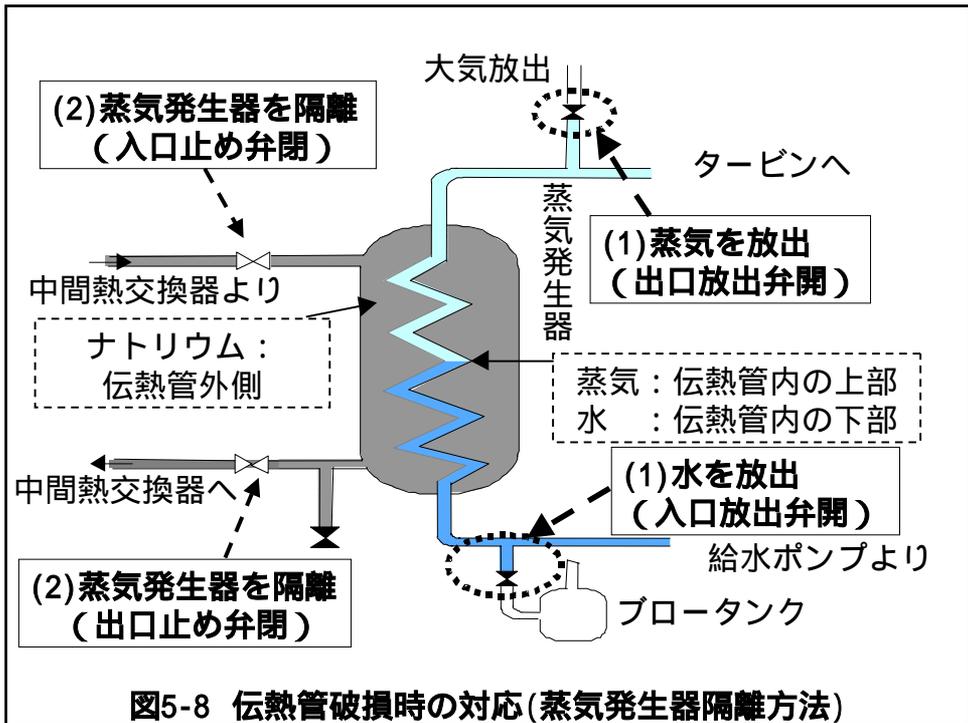
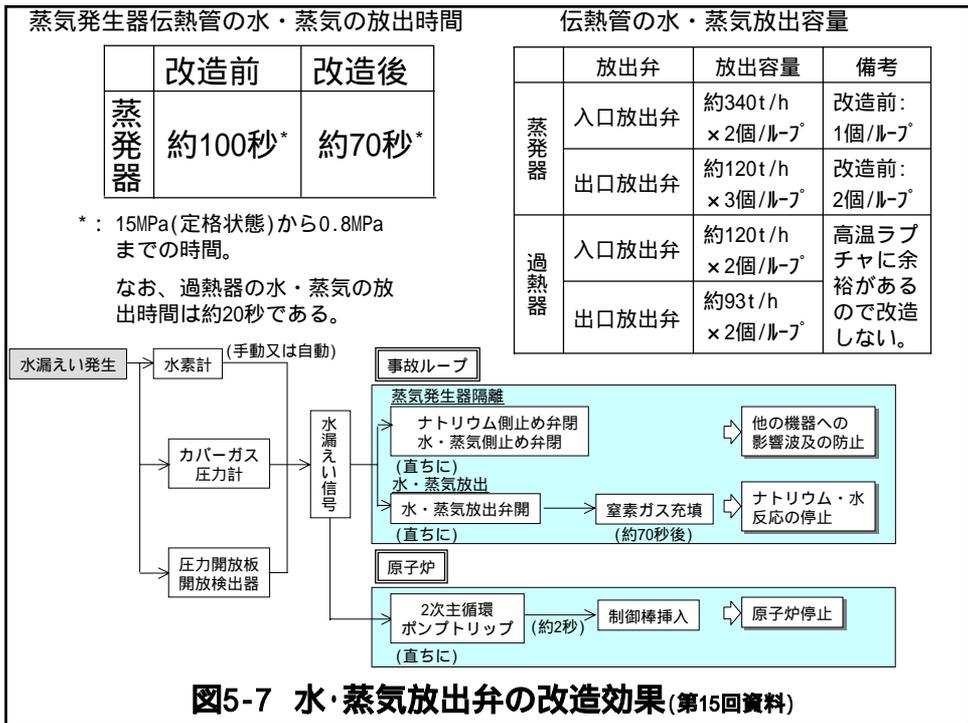
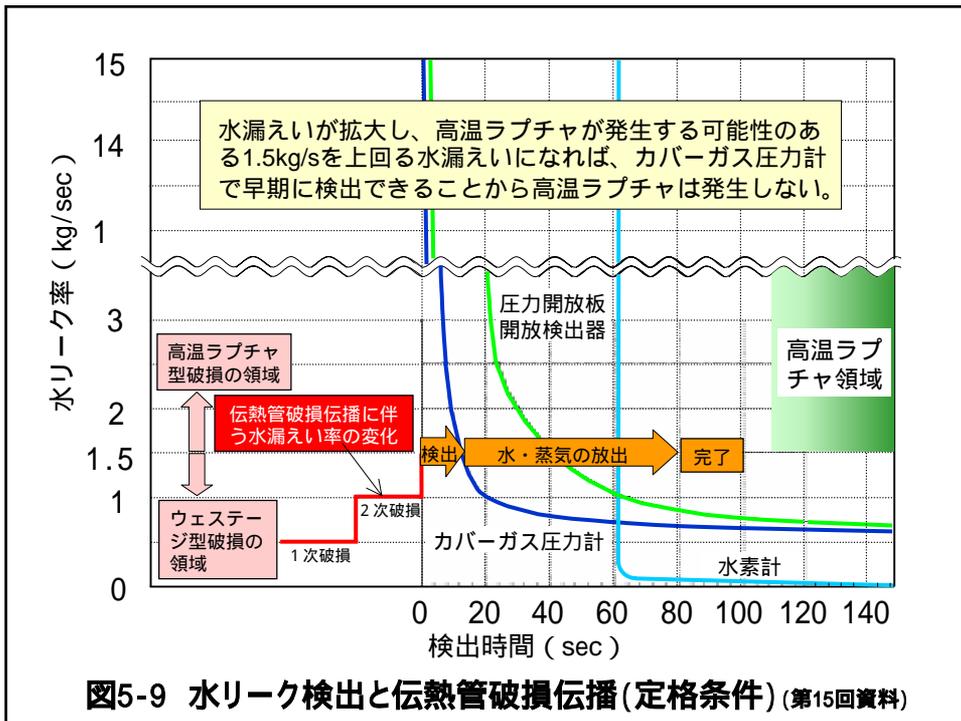


図5-6 伝熱管破損による水素の発生と検出(第5回資料)

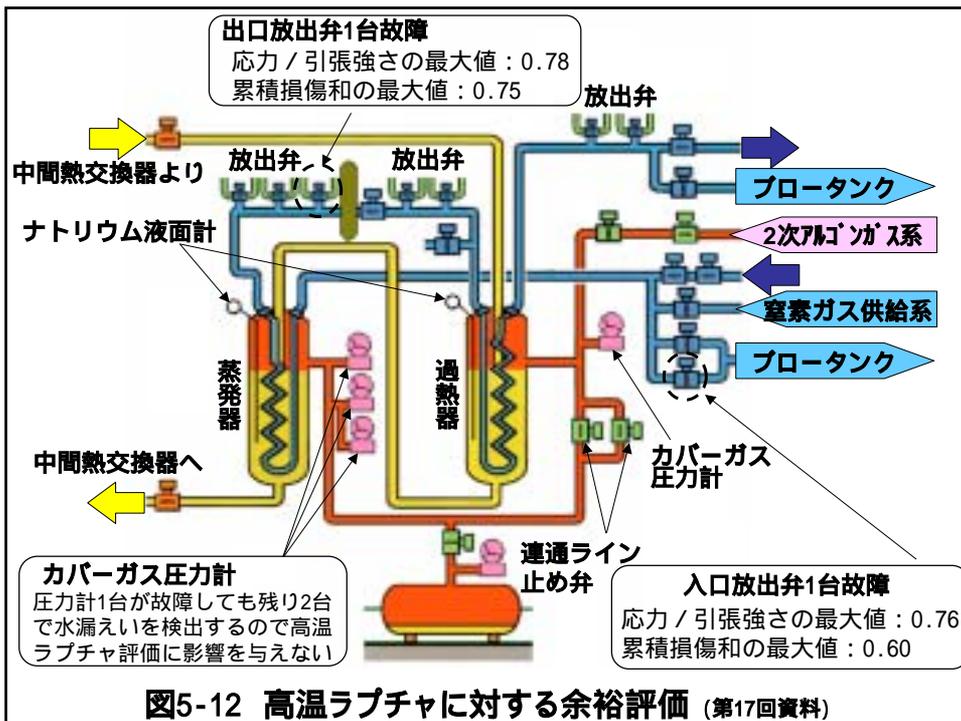
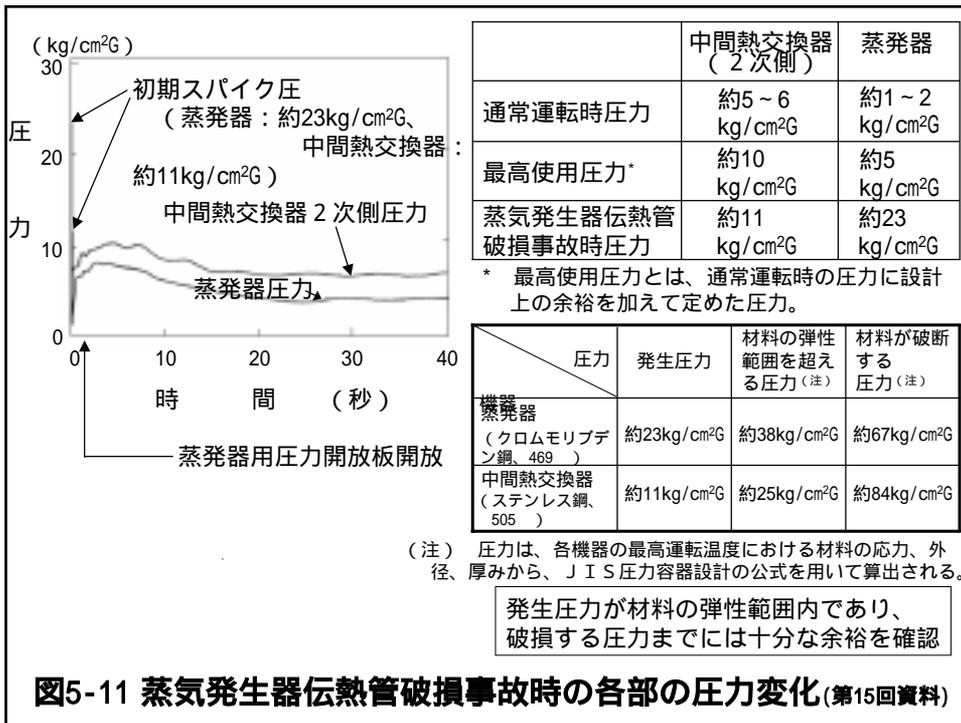


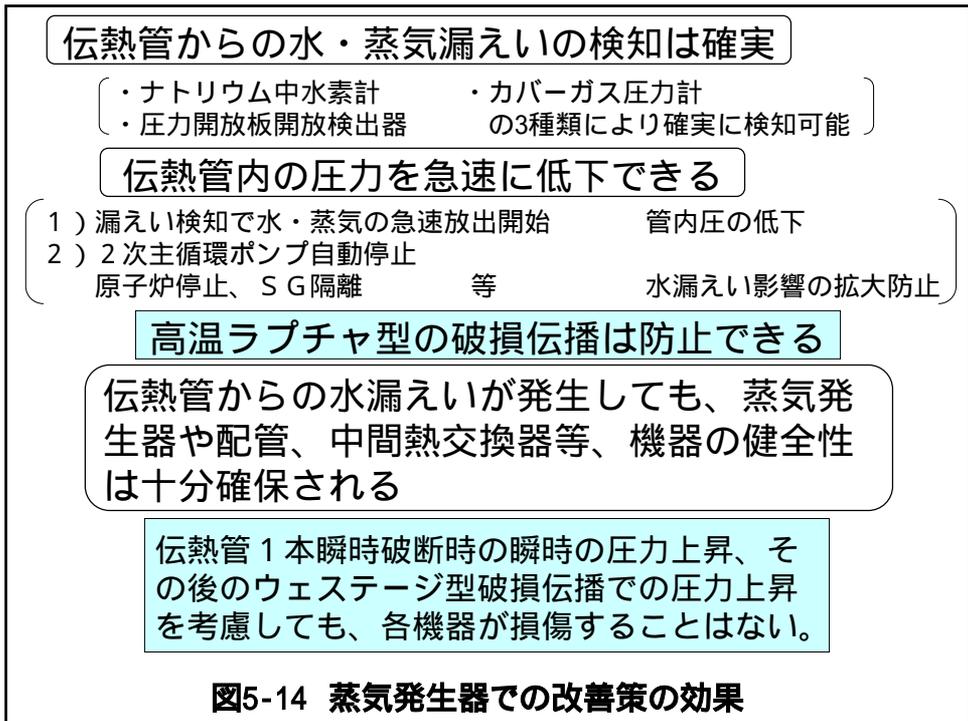
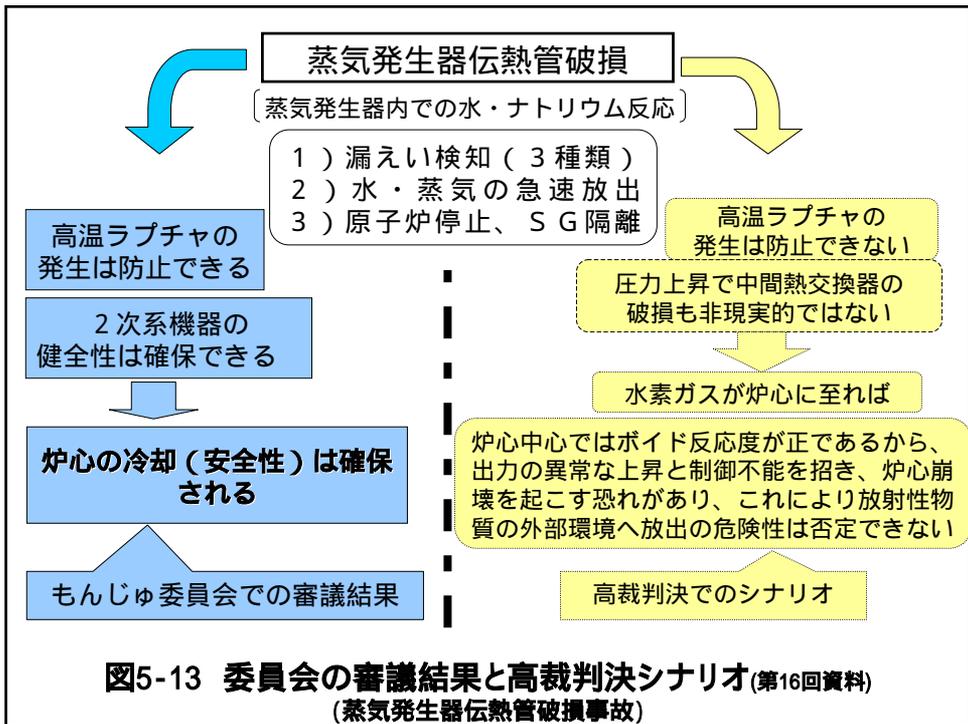


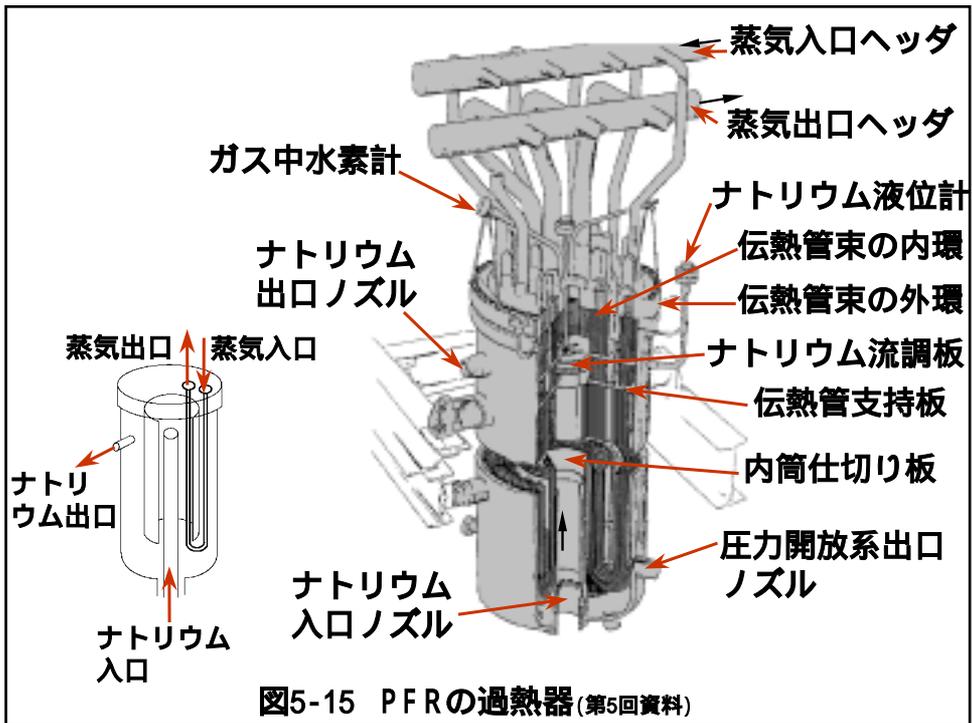
| (パラメータ) | - | 改造前設備 | | | 改造後設備 | | |
|---------------------|----|--|-----------|-----------|--|-----------|-----------|
| 伝熱管肉厚 | mm | 3.5 | | | 3.5 | | |
| 運転状態 | - | 定格 | 40% 給水 | 10% 給水 | 定格 | 40% 給水 | 10% 給水 |
| 水リーク位置* | - | 管束部中部 | | | 管束部中部 | | |
| 水漏えい検出 | - | カバーガス圧力計 (設定値1.7kg/cm ² G) | | | カバーガス圧力計 (設定値1.5kg/cm ² G) | | |
| 水ブロー開始時間 (Na側条件) | 秒 | 14 | 15 | 18 | 11 | 12 | 14 |
| 反応域最高温度 | | 1,170 | 1,170 | 1,110 | 1,170 | 1,170 | 1,110 |
| 応力/引張強さ | - | 0.87 | 0.94 | 0.81 | 0.86 | 0.79 | 0.74 |
| 累積損傷和 | - | 0.70 | 0.84 | 0.99 | 0.34 | 0.33 | 0.52 |

* : 水リーク位置は結果が最も厳しくなる位置
 : 判断基準、この数値が1を超えると解析上、高温ラプチャが発生すると判断される。
 注) 40%及び10%給水流量は制御誤差考慮のケース。

図5-10 「もんじゅ」蒸発器高温ラプチャ解析結果のまとめ(第15回資料)







| | |
|--|-----------------------------------|
| 事故時のPFRの状況 | もんじゅの状況 |
| 内筒の仕切り板隙間からの流れが伝熱管を振動 | 内筒は溶接による管構造で隙間無し |
| 事故当時、水素検出器が故障したまま運転した | 水素濃度が監視できない状態では運転しない |
| 過熱器に高速減圧系 ^(*) が未設置 | 全ての蒸気発生器に高速減圧系 ^(*) が設置 |
| ^(*) 高速減圧系 伝熱管破損時に高速で水・蒸気を排出することを目的とする動作の速い弁を用いた大容量の減圧系統。 | |

PFR過熱器

英国では改善策を実施して運転再開
もんじゅでは設備対応済み

図5-16 英国PFRの事故の原因と「もんじゅ」の状況 (第5回資料)

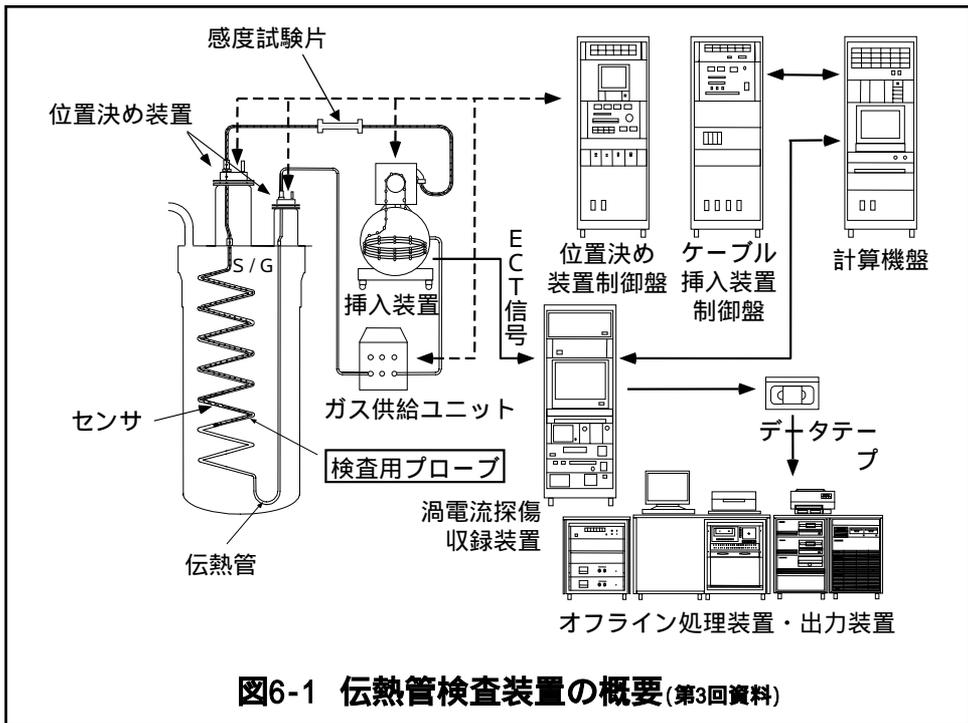


図6-1 伝熱管検査装置の概要(第3回資料)

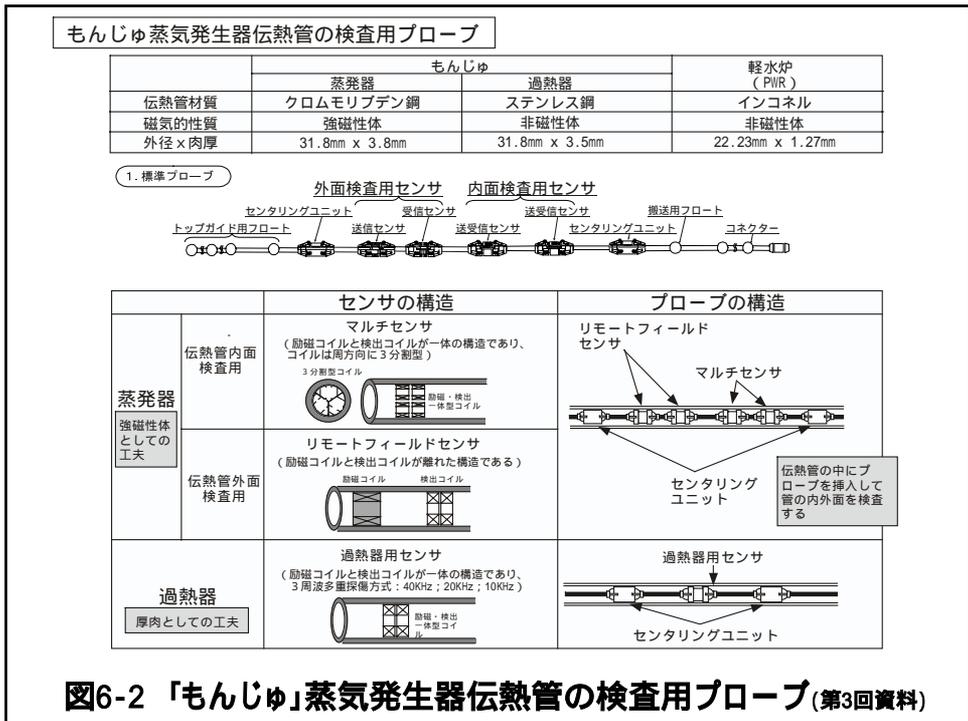


図6-2 「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の検査用プローブ(第3回資料)

1 プローブ単体での欠陥の検出性能

検査装置のプローブ単体の欠陥検出性能は、クロムモリブデン鋼など強磁性体材料よりステンレス鋼などの非磁性体材料の方が、また外面欠陥より内面欠陥の方が良好である。最も検出が難しい強磁性体材料の外面での検出性は現状で以下の程度である。

- ・全周減肉欠陥（幅10mm、全周）：板厚の2%減肉
 - ・局部減肉欠陥（幅10mm、周方向長さ10mm）：板厚の20%減肉
 - ・周方向ノッチ状欠陥（幅0.5mm、周方向長さ10mm）：板厚の75%深さ
 - ・軸方向ノッチ状欠陥（幅0.5mm、軸方向長さ10mm）：板厚の75%深さ
 - ・ピンホール状欠陥（3mm）：板厚比95%深さの穴
- 参考 内面軸方向ノッチ状欠陥：板厚の50%深さ
（幅0.5mm、軸方向長さ10mm）

2 検査装置での減肉欠陥の検出性能

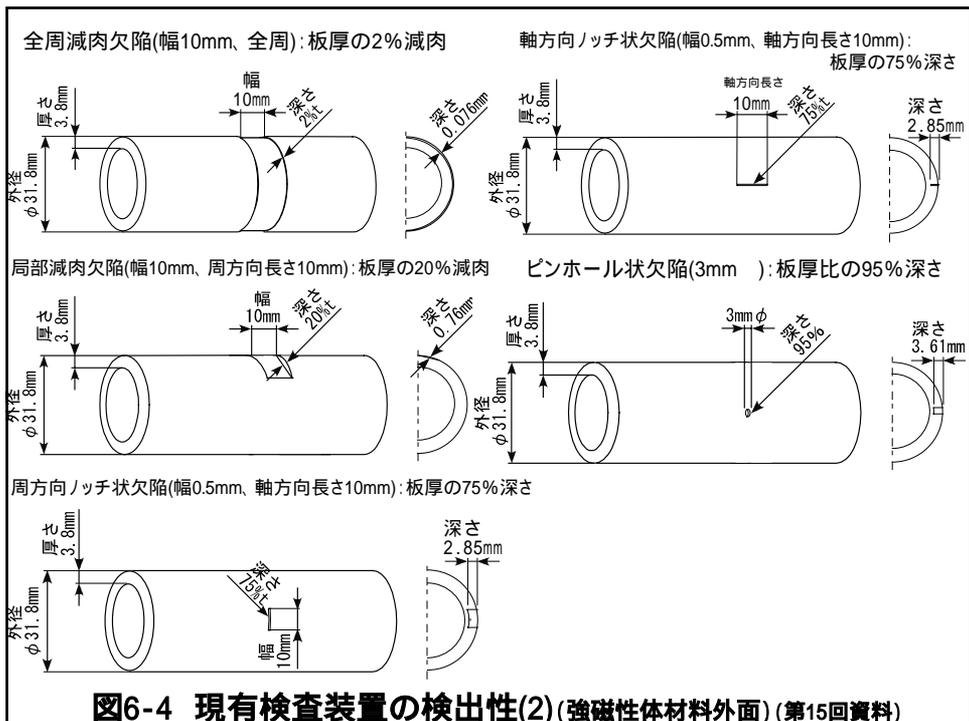
(1) 検査目標

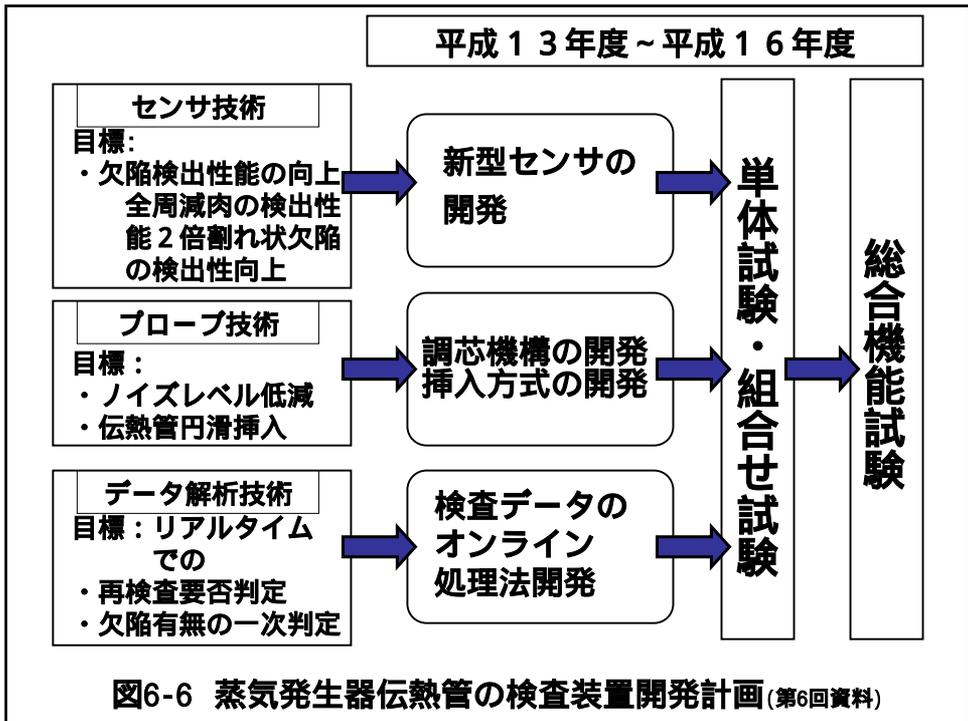
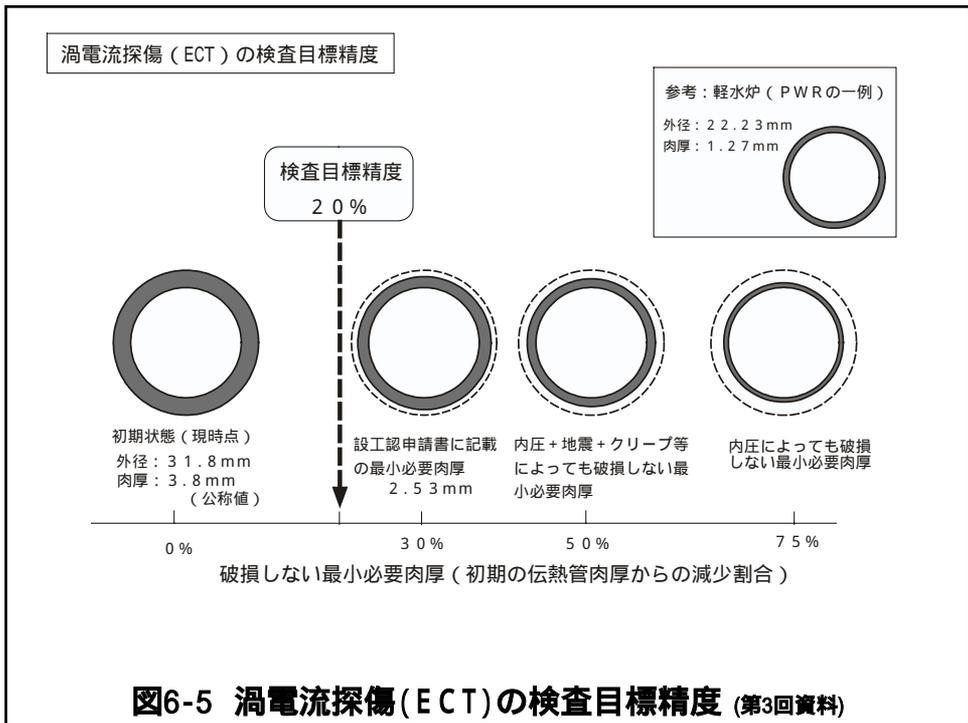
- ・伝熱管板厚の20%深さ減肉の検出。

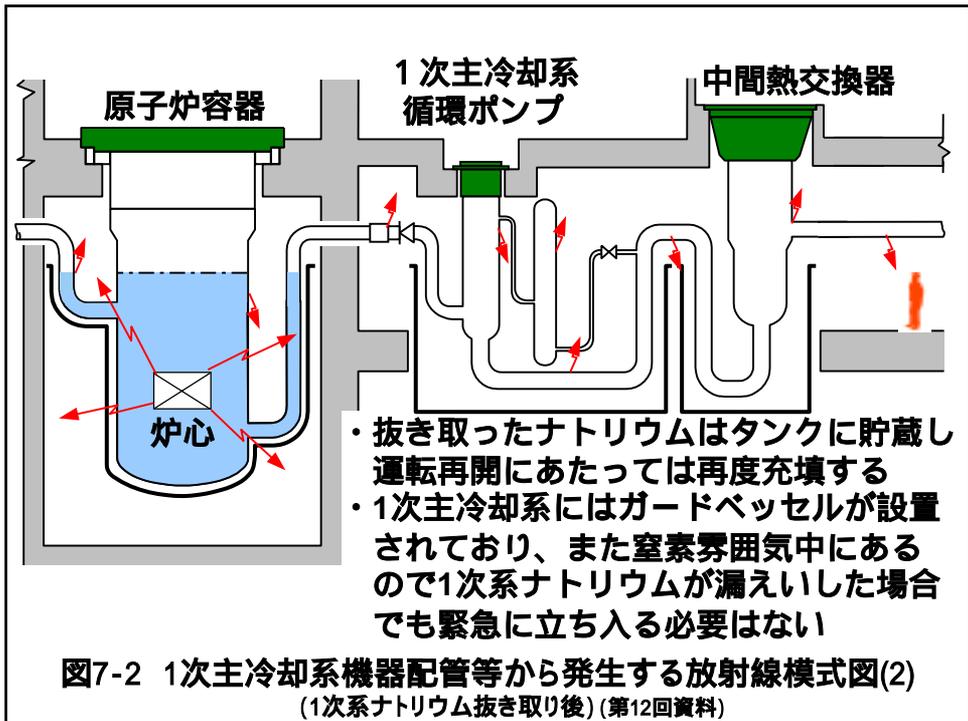
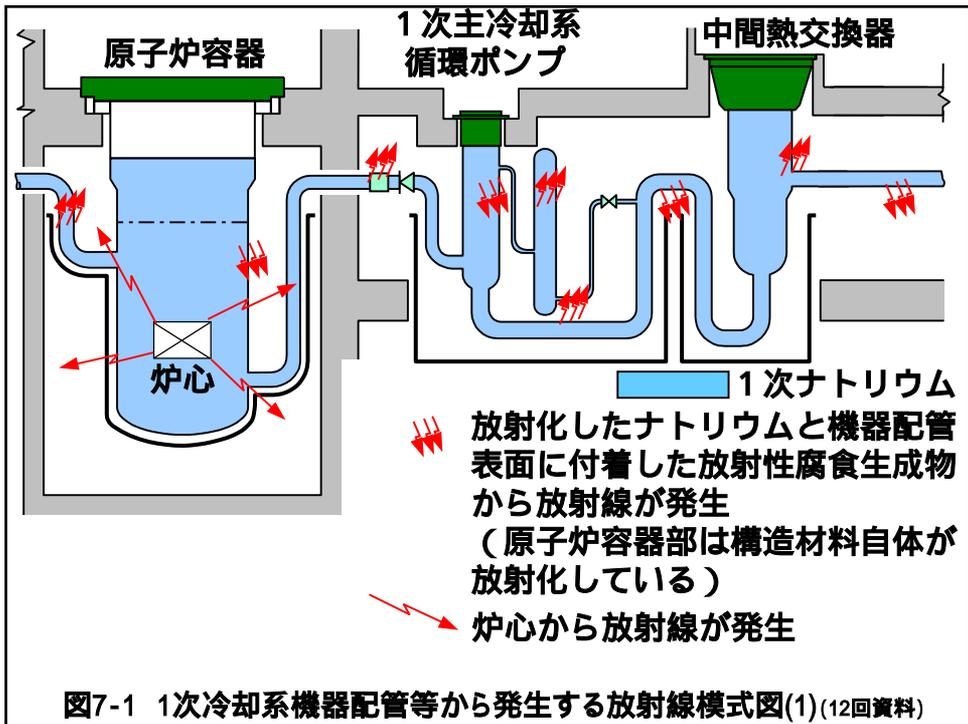
(2) 検出可能な減肉欠陥（実物大の模擬試験装置による検査装置機能試験）

- ・蒸発器 内面；2.5%深さ相当、外面；5～10%深さ相当
- ・過熱器 内面；1%深さ相当、外面；2%深さ相当

図6-3 現有検査装置の検出性(1)(第3回資料)







もんじゅ（高速増殖炉）の特徴

冷却材に沸点の高いナトリウムを使用

低圧条件
 高温条件

薄肉構造を採用

もんじゅと軽水炉の比較

| | | 「もんじゅ」 | 軽水炉（PWR） |
|-------------------|-------|---------------------------------------|--|
| 冷却材 | | ナトリウム | 水 |
| 冷却材 温度 | 原子炉入口 | 約400 | 約290 |
| | 原子炉出口 | 約530 | 約325 |
| 冷却材圧力 (炉心出口圧力) | | 約0.2MPa (約1.6kgf/cm ²) | 約15.4MPa (約150kgf/cm ²) |

(大気圧：約0.1MPa)

図8-1 「もんじゅの」特徴と軽水炉との比較

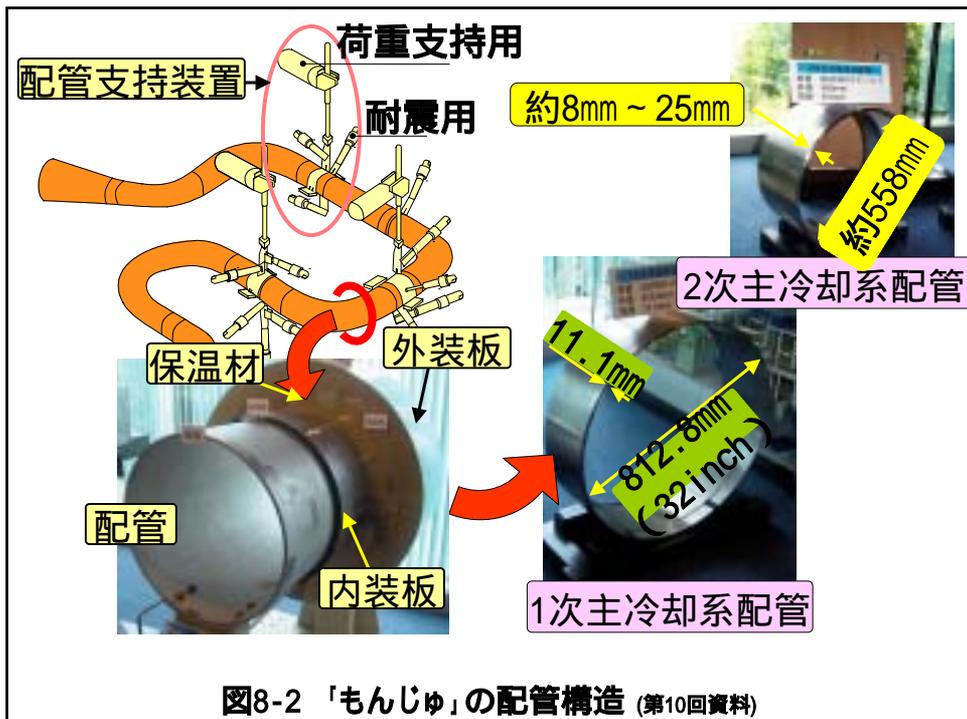


図8-2 「もんじゅ」の配管構造 (第10回資料)

配管支持装置の役割

熱膨張による緩やかな変位は拘束しない。

地震等の急速な力に対しては、配管を拘束する。

メカニカル防振器

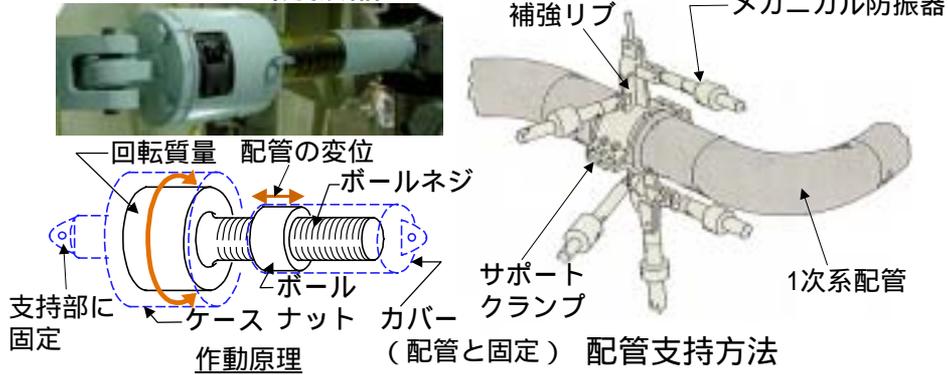


図8-3 配管支持装置(第10回資料)

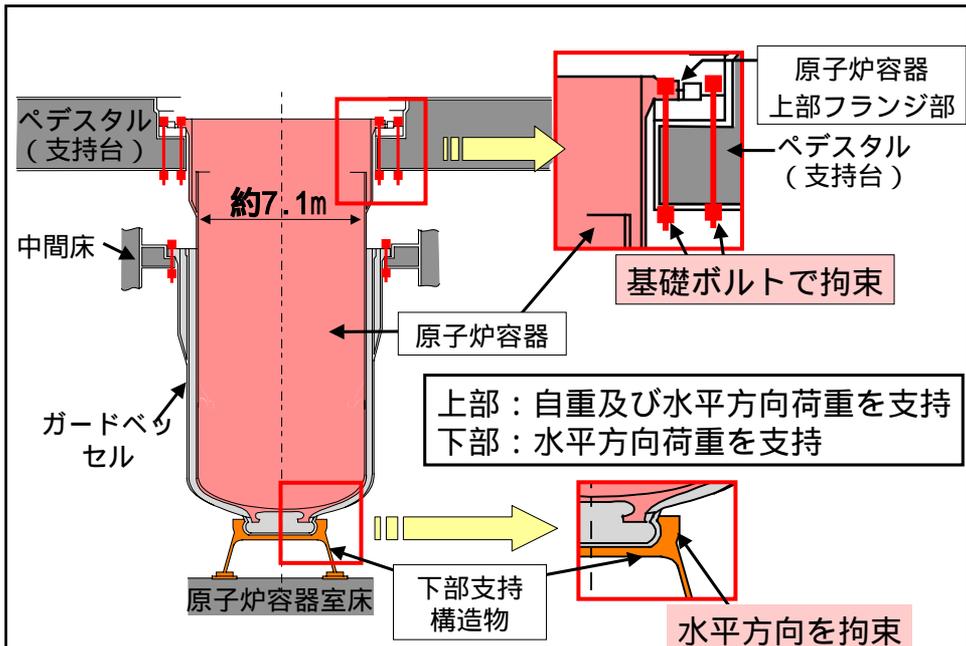


図8-4 原子炉容器の設計(支持部)(第10回資料)

| | トラブル事例 | プラント | 国 | 発生 | INES評価 |
|----|-------------------------------------|------------|--------|----------|--------|
| 1 | 1次アルゴンガス系への空気の混入によるナトリウム純度低下及び原子炉停止 | スーパーフェニックス | フランス | 90/07/03 | 2 |
| 2 | 反応度低下による原子炉停止 | フェニックス | フランス | 90/09/09 | 2 |
| 3 | 液体放射性廃棄物の外部漏えい（ポンプ誤操作による溢水） | BN-600 | ロシア | 92/12/23 | 2 |
| 4 | 1次ナトリウム純化系配管からのナトリウム漏えい | BN-600 | ロシア | 93/10/06 | 1 |
| 5 | 2次系配管からのナトリウム漏えい | BN-600 | ロシア | 94/05/06 | 1 |
| 6 | 蒸気発生器からの蒸気漏れ | スーパーフェニックス | フランス | 94/11/15 | 0 |
| 7 | 2次冷却材ポンプの誤停止（潤滑油系の定期切替失敗）による原子炉出力低下 | BN-350 | カザフスタン | 96/06/17 | 0 |
| 8 | 蒸気発生器の給水配管からの蒸気漏れ | BN-350 | カザフスタン | 97/01/22 | 0 |
| 9 | 蒸気発生器の給水配管からの蒸気漏れ | BN-350 | カザフスタン | 97/03/23 | 0 |
| 10 | 中間熱交換器細管での微細割れ | フェニックス | フランス | 98/11/06 | 該当せず |

出典 国際原子力事象尺度に基づく事故・故障事例集(日本原子力研究所)

参考図1 海外のFBRプラントにおける主なトラブル事例

| | レベル | 基準（最も高いレベルが当該事象の評価結果となる） | | | 参考事例 (INESの公式評価でないものが含まれている) |
|-------|--------------------------|--|--|---------------------|---------------------------------|
| | | 基準1：所外への影響 | 基準2：所内への影響 | 基準3：深層防護の劣化 | |
| 事故 | ⑦ (深刻な事故) | 放射性物質の重大な外部放出 (ヨウ素131等価で数万テラベクレル相当以上の放射性物質の外部放出) | | | チェルノブイリ事故 (1986年) |
| | ⑥ (大事故) | 放射性物質のかなりの外部放出 (ヨウ素131等価で数千から数万テラベクレル相当の放射性物質の外部放出) | | | |
| | ⑤ (所外へのリスクを伴う事故) | 放射性物質の限られた外部放出 (ヨウ素131等価で数百から数千テラベクレル相当の放射性物質の外部放出) | 原子炉の炉心の重大な損傷 | | スリーマイルアイランド事故 (1979年) |
| | ④ (所外への大きなリスクを伴わない事故) | 放射性物質の少量の外部放出 (公衆の個人の数ミリシーベルト程度の被ばく) | 原子炉の炉心の重大な損傷 / 従業員の致死量被ばく | | JCO臨界事故 (1999年) |
| 異常事象 | ③ (重大な異常事象) | 放射性物質の極めて少量の外部放出 (公衆の個人の十分の数ミリシーベルト程度の被ばく) | 所内の重大な放射性物質による汚染 / 急性の放射線障害を生じる従業員の被ばく | 深層防護の喪失 | |
| | ② (異常事象) | | 所内のかなりの放射性物質による汚染 / 法定の年間線量限度を超える従業員の被ばく | 深層防護のかなりの劣化 | 美浜発電所2号機蒸気発生器伝熱管損傷 (1991年) |
| | ① (逸脱) | 安全上重要ではない事象 | | 運転制御範囲からの逸脱 | もんじゅナトリウム漏えい (1995年) |
| 尺度以下 | ① (尺度以下) | | | 0 + 安全に影響を与え得る事象 | |
| 評価対象外 | ① (尺度以下) | | | 0 - 安全に影響を与えない事象 | |
| | | 安全に関係しない事象 | | | |

シーベルト(Sv)は、放射線が人体に与える影響を表す単位。(ミリは1,000分の1) 出展：資源エネルギー庁「原子力2002」
 ベクレル(Bq)は、放射線物質の量を表す単位。(テラは10¹²=1兆)

「深層防護の劣化」基準によればレベル0、セーフティカルチャーの欠如などがあつたことを加味したレベル

参考図2 国際原子力事象評価尺度(INES)