

福島第一原子力発電所の建屋・構造物健全性とリスク評価

(2) 1F廃炉に係る地震時健全性評価と課題

高田 毅士

東京大学名誉教授、上席研究員

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門

リスク情報活用推進室 室長

1. 分科会の活動方針案の紹介
2. 原子力施設の地震安全原則の紹介(2019)
3. 一般建築構造物の性能設計の実践
4. 事故炉の耐震健全性の確保
5. 規制庁審査における動き

分科会の活動目的

地震リスクの低減に効果的に対処するためには、細分化された旧来の専門分野毎の対応では困難であり、建築構造、機器設備、材料、荷重評価、監視技術、等の関係分野の共通理解と連携が必須である。そこで、本分科会では、以下の活動項目を設定した。

- ① 1F事故炉を対象にした長期的な廃炉作業の段階に応じた要求性能(パフォーマンスベース)に基づき建屋構造物の地震時要求性能を明確にすること、
- ② 関係する建屋・設備・機器類の現状監視技術(コンディションモニタリング)による情報収集および活用方法の検討、
- ③ 要求性能に対応した長期的な廃炉作業の段階別検討用地震動(最も起こりやすい揺れへの対応)の策定

これらの活動は1Fの廃炉作業を対象とするが、将来的には、一般発電炉の廃炉措置における、地震時健全性評価方法の構築を目指す。なお、本分科会は、他の分科会(強度基準分科会、廃炉リスク評価分科会)と連携しながら進めるものとする。

1 長期的廃炉過程における地震要求性能の分析(P)

- 1) 周辺住民の安全と廃炉作業員の安全確保
- 2) 支配的シーケンスの特定
- 3) 事故炉のソースターム評価(発電中の炉との違いは?)
- 4) 1F事故炉の特性に応じた耐震重要度(SDC)の設定
- 5) 代替設備の可能性
- 6) 現行耐震規定における耐震重要度分類(S,B,C)の課題は?

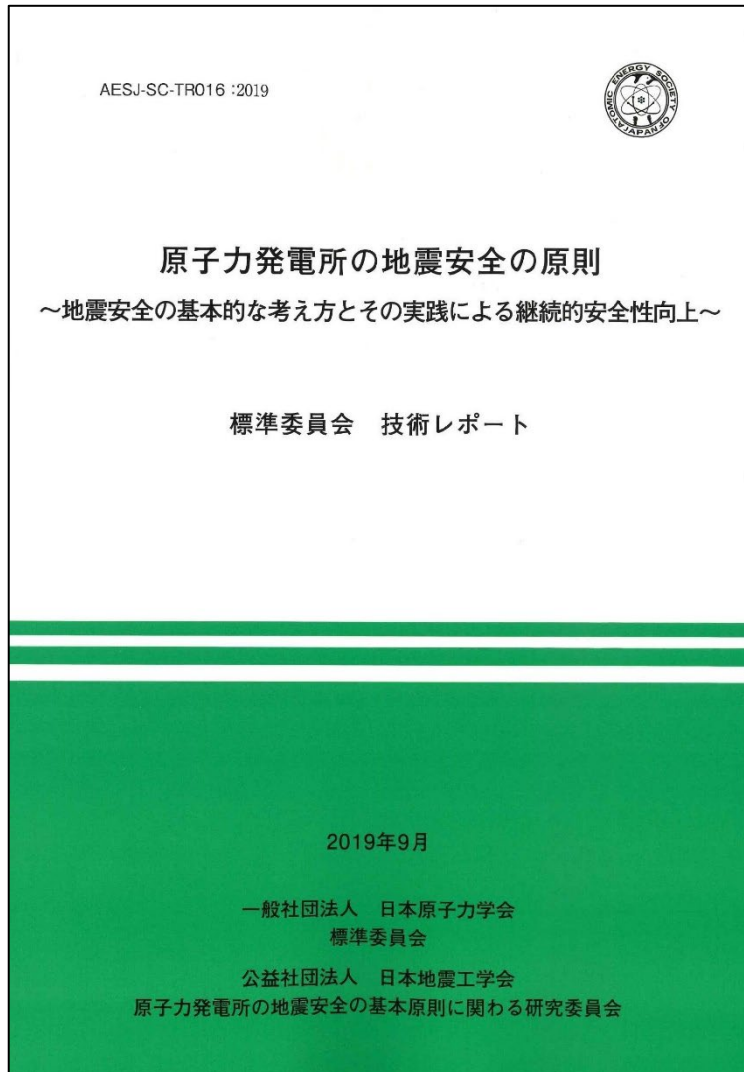
2 建屋・設備・機器等の状態評価・監視技術(M)

- 1) 事故炉の状態評価(不確定性に着目して)
- 2) 事故炉地震フラジリティ評価(部位、設備、事故シーケンス、プラントレベル)
- 3) 事故炉の事故ETの分析(JAEA文献あり)
- 4) 事故炉毎のET構築と支配シーケンスの特定
- 5) 状態監視技術(地震計、変位計の設置)

3 廃炉過程中的段階別検討用地震動の概念と評価(E)

- 1) 1Fサイトの確率論的地震動評価の実施(今後20年、50年)
- 2) レベル(年超過確率)に応じた支配地震および支配地震動(波形)の評価
- 3) 地震要求性能確保のための地震動の設定(耐震重要度分類に従った地震動設定)

2. 原子力施設の地震安全原則



原子力発電所の地震安全の原則

～地震安全の基本的考え方とその実践による継続的安全性向上～

(AESJ-SC-TR016:2019)

(7,700円)

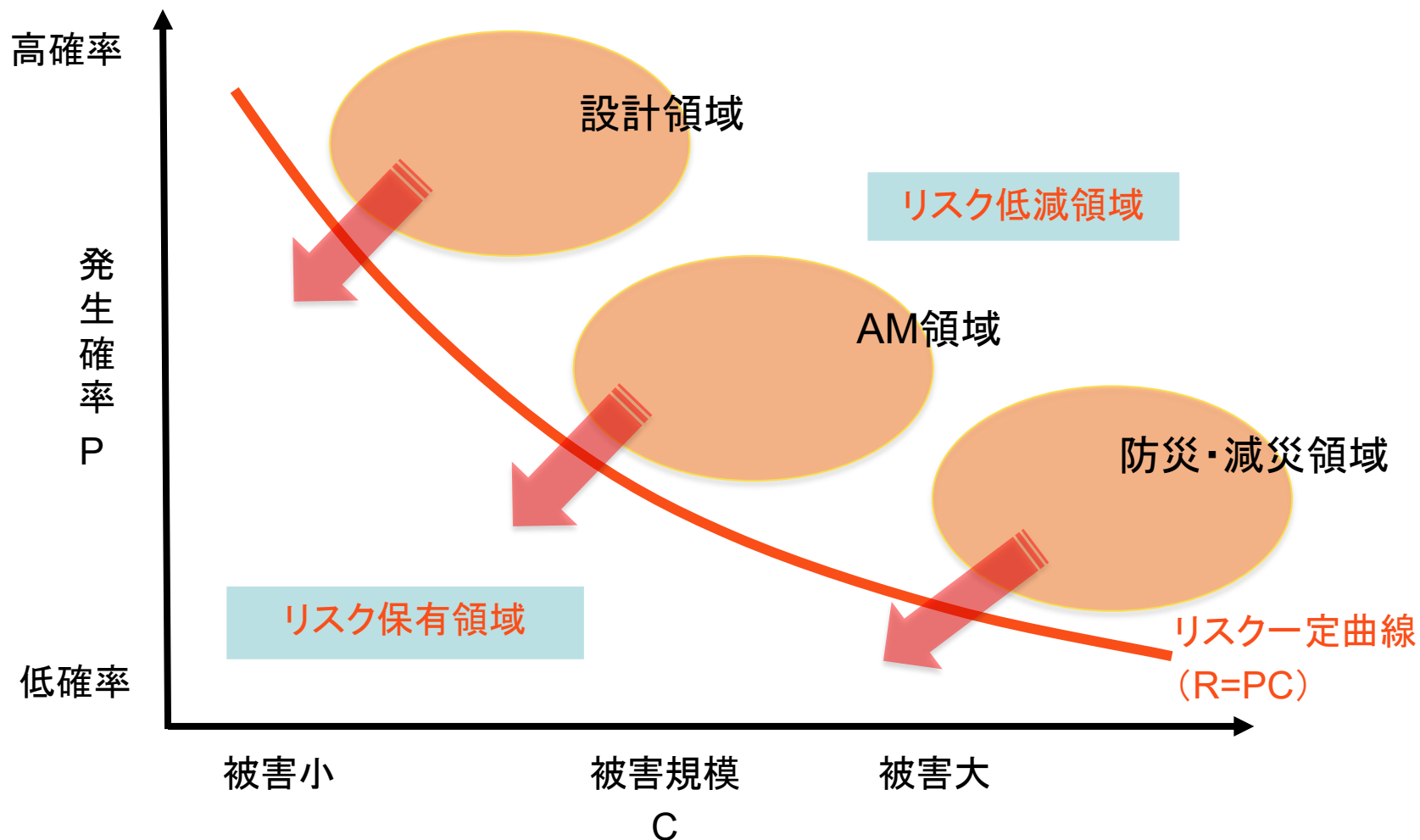
地震安全性：

安全(safety)は、「受容できないリスクが無いこと」であり、地震安全とは、地震および地震随件事象が発生した場合においても、人と環境に対し、原子力発電所の施設とその活動に起因する受容できない放射線リスク(放射線の有害な影響に対するリスク)が無い状態にすることにある。

発電所としての供用性：

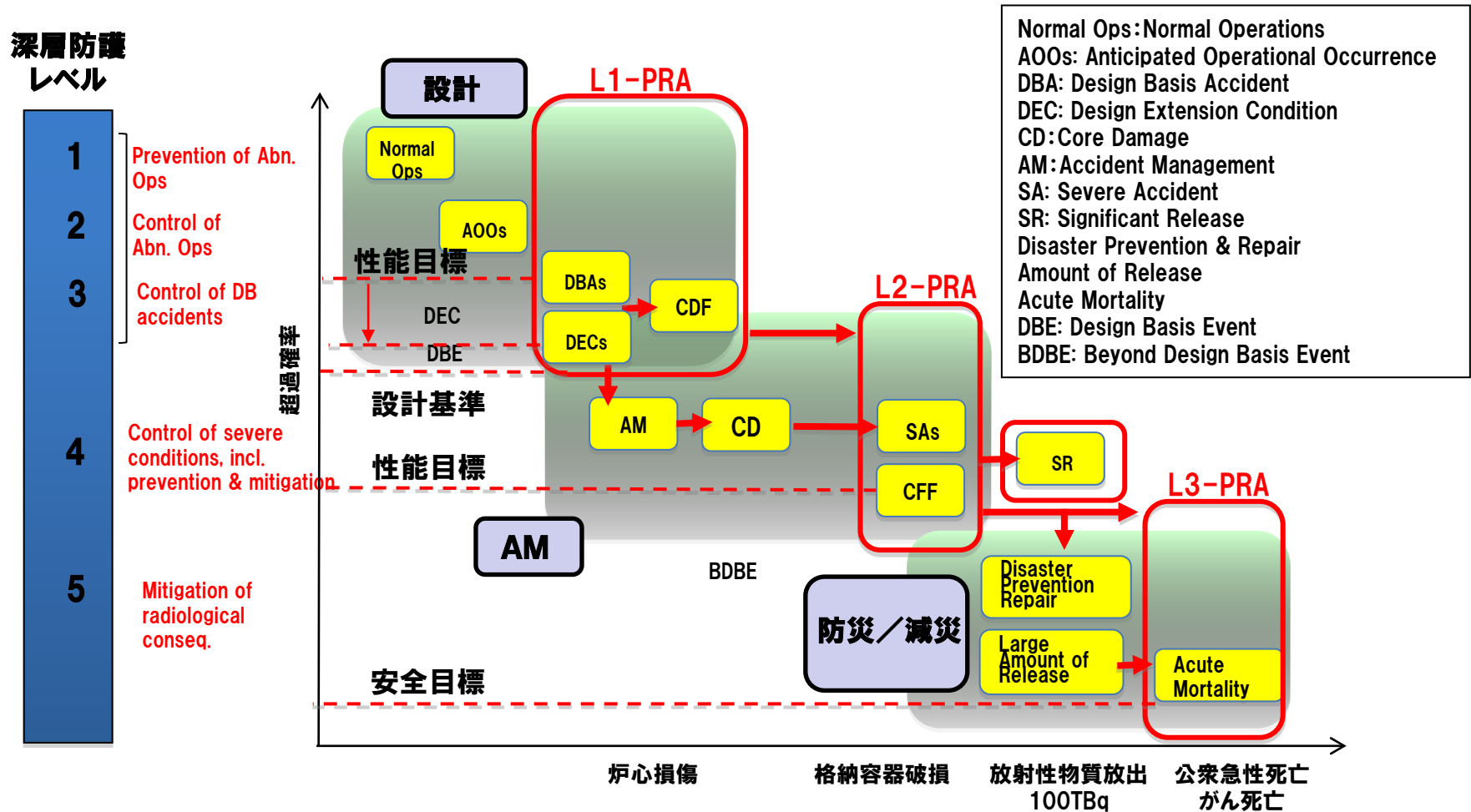
供用性(serviceability)とは、そのシステムが持つ社会的役割であり、「社会性」、「使用性」とも言われる。原子力発電所における社会的役割は、我が国におけるエネルギー安全保障(security)の確保のための電力の供給である。

多段階の安全性確保のスキーム



日本地震工学会(2019)、「原子力安全のための耐津波工学」報告書より

安全確保のための領域と俯瞰的視点



日本地震工学会(2015)、「原子力安全のための耐津波工学」報告書より

3. 一般建築構造物の性能設計の実践

◆基本要件性能は、1)安全性、2)使用性、3)修復性の三つ。

安全性: 安全性は人命に関わるものであり、建築物の中や周辺の人間の人命を守るために建築物に要求される最も重要な性能である。
「人命の保護」

使用性: 使用性とは、建築物の使用目的、用途、機能に直接関わるものであり、この性能が満足されないと、建築物に期待されている機能や用途が十分果たせなくなる。(ex. 床のたわみ、壁や床の過大な振動、基礎の不同沈下等々)「機能の確保および居住性の確保」

修復性: 建物として修復が出来る状態に関する性能。「財産の保全」

米国Vision2000の目標性能マトリクス

地震動の 設計レベル (再現期間)	地震動に対する耐震性能のレベル			
	完全 営業可能	営業可能	人命安全	崩壊寸前
頻繁な (43年)	●	×	×	×
時々 (72年)	■	●	×	×
稀に (475年)	★	■	●	×
極めて稀に (970年)		★	■	●

× : 設計不可, ● : 普通の建物, ■ : 重要・危険な建物, ★ : 高度な安全性が要求される建物

Vision2000 (性能に基づく建築物の耐震工学、 SEAOC: Structural Engineers Association of California、 1995)

- ・ 耐震分野における性能設計の模範?
- ・ 複数の耐震要求性能を明示した設計法を提供
- ・ 設計用地震荷重を設計再現期間で表現
- ・ 実用性に優れる
- ・ 建物耐震性能に関してクライアントとの対話を重視

4. 事故炉の耐震健全性の確保

- 1. 要求性能に基づいた性能確保が基本**
- 2. 要求性能確保のための現実的評価に基づく
(できるだけ現実に忠実な評価)**
- 3. 不確定性はできるだけ低減する
(観測、測定、内部調査結果の活用)**

地震に対する要求性能比較（未完）

基本性能		通常炉施設	通常炉の廃炉	事故炉の廃炉
安全性	公衆	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和
	作業員	過度な放射線被ばくの防止	過度な放射線被ばくの防止	過度な放射線被ばくの防止
供用性	社会	発電継続性 地震後再使用性	—	—
	廃炉 project	—	?	?
備考		耐震設計審査指針(2006)に準拠	耐震設計審査指針(2006)に準拠 廃炉段階で変化する機能に応じた性能を確保	

廃炉の各段階における要求性能

表 2.2.1-1 廃炉の各段階における要求性能

工程	事故前	事故収束前	第一期	第二期	第三期
		冷温停止状態の達成まで	プール内燃料取出開始まで	プール内燃料取出開始から燃料デブリ取出し開始まで	燃料デブリ取出し開始から解体、廃止措置終了まで
閉じ込めが必要な放射性物質 ^{注1}	炉内の燃料汚染水 使用済み燃料	燃料デブリ 汚染水（建屋内滞留水） 使用済み燃料			燃料デブリ 汚染水（建屋内滞留水）
プラントに求められる基本的な安全機能 ^{注2}	止める 冷やす 閉じ込める	冷やす	冷やす ^{注3} 閉じ込める		
建屋に対する要求機能	遮へい性 気密性 水密性 構造安全性	構造安全性	放射性物質を含む物質の閉じ込め 構造安全性		
留意事項		建屋の損傷 屋根崩落等の影響 事故時の熱履歴	加えて 上部カバー重量、反力の影響	加えて デブリ取出に伴う設備等の影響 高経年化対策	加えて 解体進展に応じた状態変化 高経年化対策

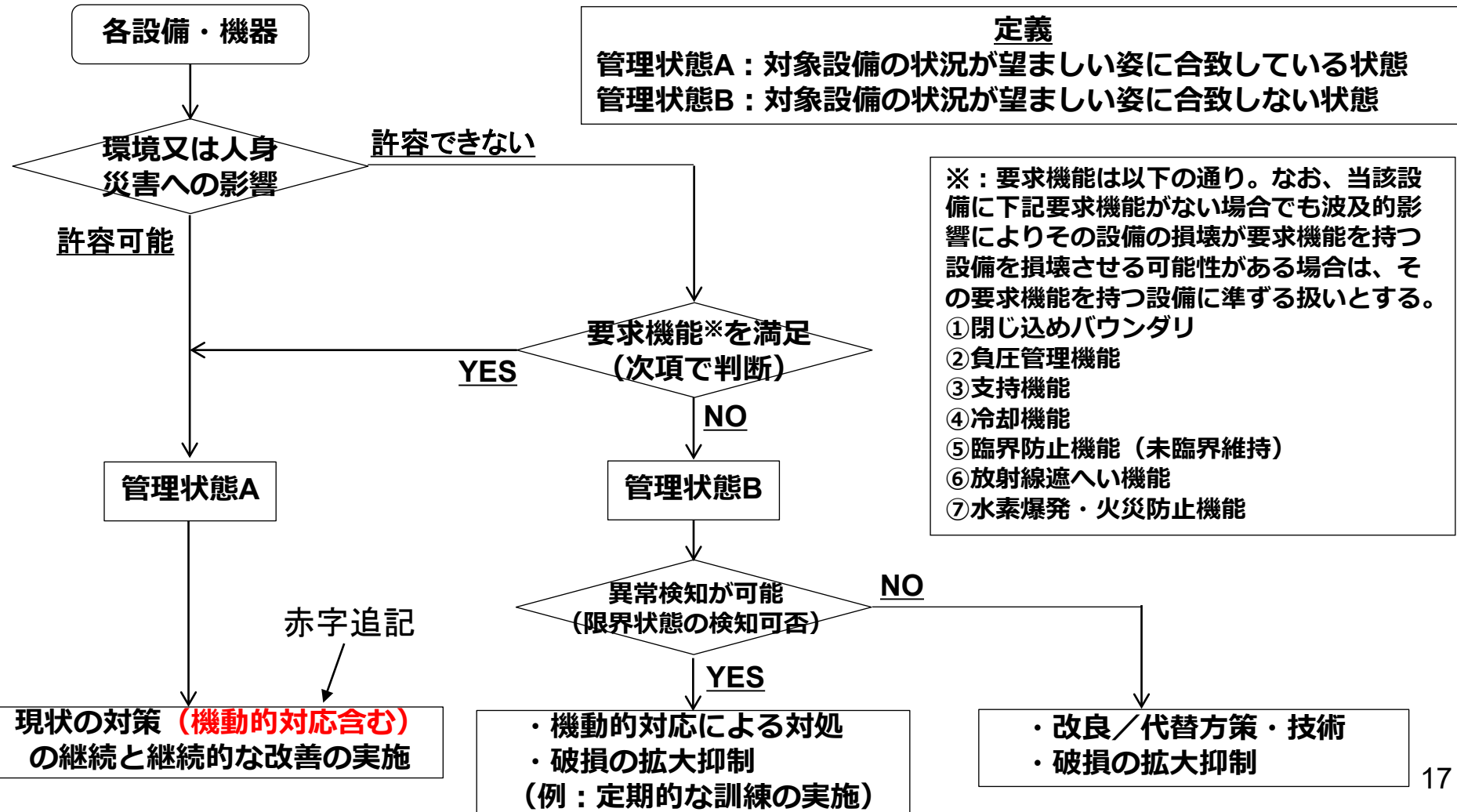
注1：瓦礫等については別途対処することとし、閉じ込めが必要な放射性物質として表に含めることはしていない。

注2：プラントに求められる基本的な安全機能は、閉じ込めが必要な放射性物質に関するリスクの大きさに応じて異なる。

注3：廃止措置の進捗に伴う放射性物質やデブリ燃料取出に向けた対策等により、安全確保に係る設備に求められる機能は変化（要求機能の消滅及び低減）するため、必要に応じて安全対策を実施する。

【振返り】管理状態評価フロー（強度基準分科会の資料）

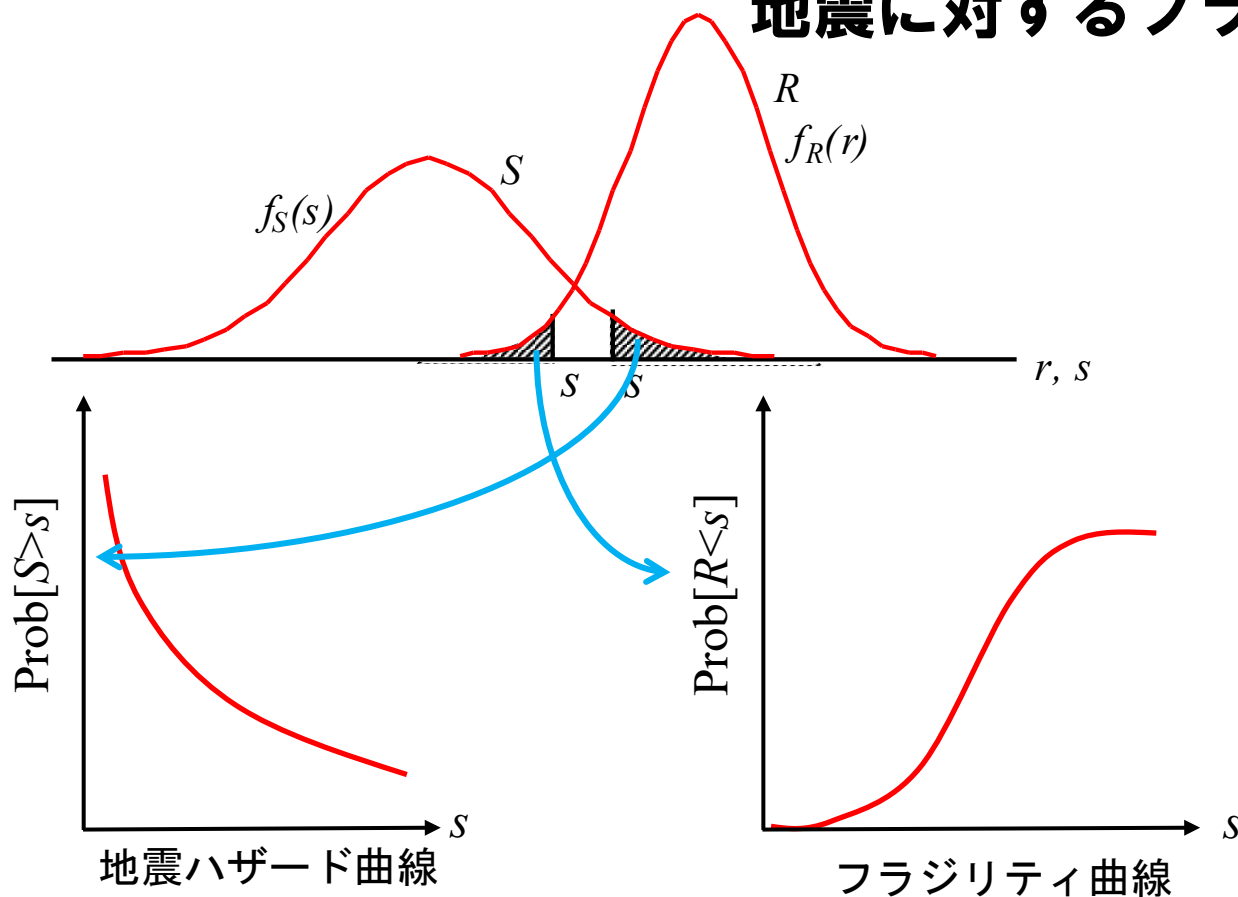
- 設備・機器の管理状態を評価し、その状態に応じた対策を要求している。
- 設備状態の変化（PCV水抜き等）や廃炉作業の進捗に伴って検査・補修等が可能になる等、状態が変化した場合には再評価する。
→ 一旦評価すると終わりではなく、継続的に評価（スライド4の④に該当）



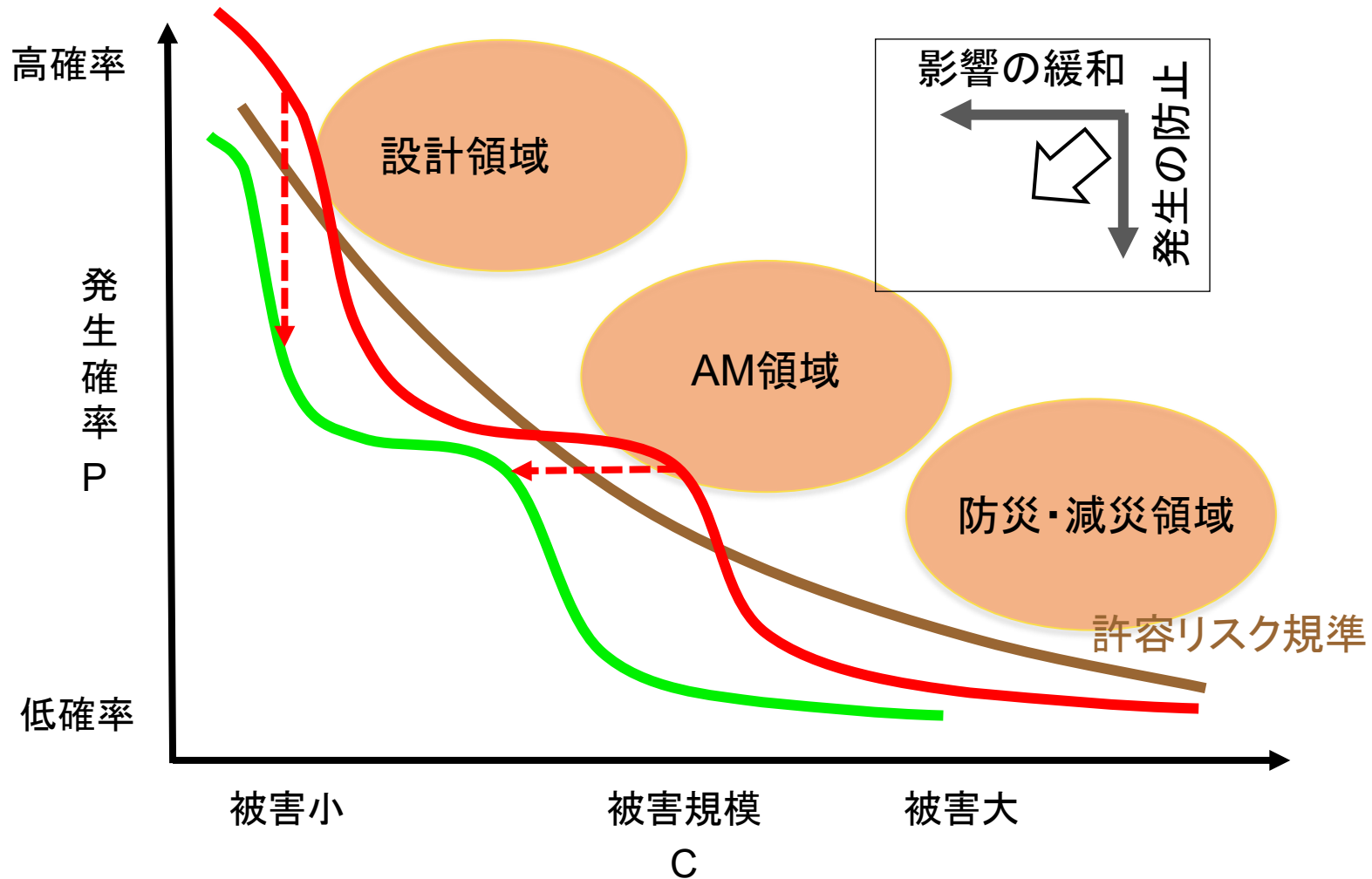
地震時安全余裕 = プラントの耐力 - プラントに作用する地震力
 = プラントが損傷する時の入力地震力 - プラントに作用する地震力
 $G = R - S$

地震に対するプラントの余裕の表現

$$G = R - S$$



廃炉におけるリスク低減の概念



4 - 2 建屋・機器等の状態評価・ 監視技術の開発

- ① 事故炉の状態評価(不確定性に着目して)
- ② 事故炉地震フラジリティ評価(部位、設備、事故シーケンス、プラントレベル)
- ③ 事故炉の事故ETの分析(JAEA文献あり)
- ④ 事故炉毎のET構築と支配シーケンスの特定
- ⑤ 状態監視技術(地震計、変位計の設置)

4-3 検討用地震動の概念

1. 要求性能に基づいた性能確保を基本とする
 - 《公衆の安全》 公衆の放射線被ばくを防止するレベル
 - 《作業員の安全》 地震時の作業員の安全確保レベル
2. 要求性能に関係する対象の現実的評価に基づく
要求性能レベルに最も適する地震動とは？
(≠従来の設計用基準地震動 S_s , S_d)
3. 不確定性はできるだけ低減する
(低減できない不確定性は適切に考慮する)

検討用地震の設定（2019）

基準地震動Ssの策定

- 1) 基準地震動Ss-1(450gal) 内陸地殻内地震とプレート間地震の評価結果を上回るように設定
- 2) 基準地震動Ss-2(600gal) 海洋プレート内地震の評価結果を上回るよう設定
- 3) 基準地震動Ss-3(450gal) 震源を特定せず策定する地震動

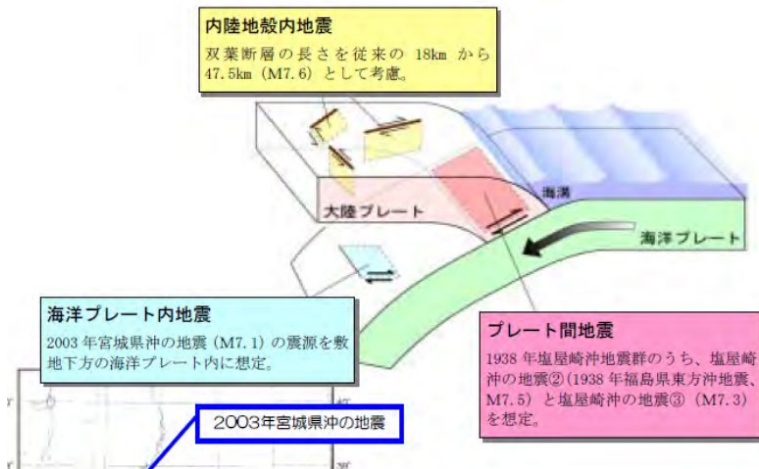
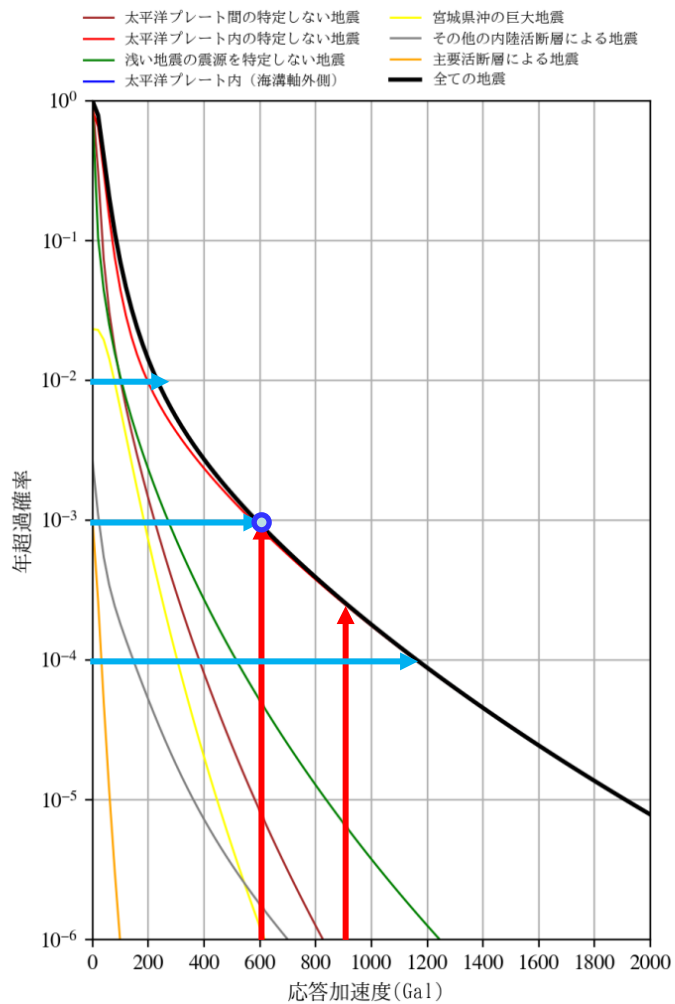
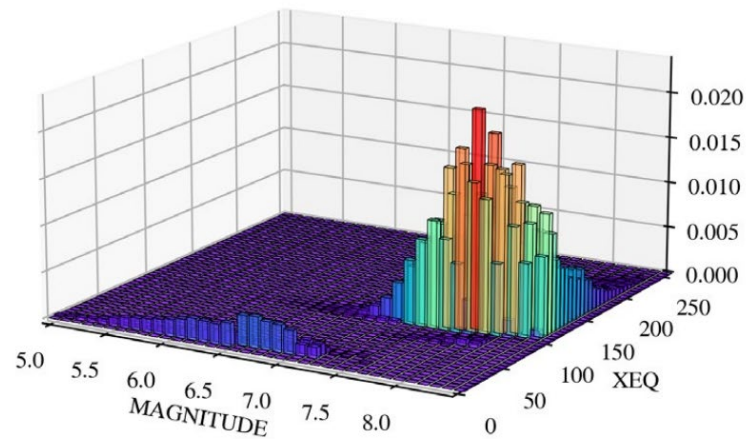


図 2.3-2 検討用地震と仮想塩屋崎沖の地震¹⁾

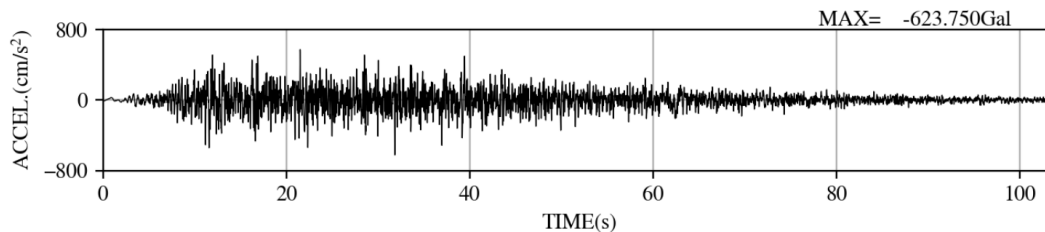
地震ハザード曲線の分解結果（新規検討）



$p=0.001$
 $M=7.9$
 $X_{eq}=110\text{km}$
 $\epsilon=1.7$



wave-10009.wav



(a) ACCELERATION

図 2-16 ハザード曲線 (周期 0.02 秒。内陸補正係数考慮、プレート内地震の観測補正考慮)

地震動の年超過確率 10^{-3} に相当する地震動

5. 規制庁審査における動き

耐震クラス分類と地震動の適用の考え方 (2022.11.21)

東京電力福島第一原子力発電所の施設・設備の耐震評価においては、以下の二つを考慮して適用する地震動を設定するとともに、必要に応じて求める対策を判断する。

- ① 耐震クラス分類(S, B+, B, C)
- ② 設計の進捗、廃炉活動への影響、供用期間 等

耐震クラス分類とクライテリア判断の流れ

公衆被ばく線量: PED

1Fの施設・設備

地震により安全機能を失った際の公衆への被ばく影響を評価

$5\text{mSv} < \text{PED}$

暫定Sクラス

$50\mu\text{Sv} < \text{PED} < 5\text{mSv}$

暫定Bクラス

$\text{PED} < 50\mu\text{Sv}$

暫定Cクラス

インベントリに基づく評価

現実的な緩和対策を考慮(被ばく期間、放射線防護対策、建屋耐震設計など)

$5\text{mSv} < \text{PED}$

Sクラス
 【動的地震力】
 Ss 900機能維持
 Sd 450弾性範囲
 【静的地震力】
 水平:3.0Ci (0.6G)
 鉛直:1.0Cv (0.2G)

$50\mu\text{Sv} < \text{PED} < 5\text{mSv}$

長期的に使用する設備、または地震により運転できないこともしくは作業員への被ばく影響が生じるによりリスク低減活動への影響が大きい設備

B+クラス
 【動的地震力】
 1/2Ss 450機能維持
 1/2Sd 225弾性範囲 (共振時のみ)
 【静的地震力】
 水平:1.5Ci (0.3G), 鉛直: -

$\text{PED} < 50\mu\text{Sv}$

Bクラス
 【動的地震力】
 1/2Sd 225弾性範囲 (共振時のみ)
 【静的地震力】
 水平:1.5Ci (0.3G)
 鉛直: -

Cクラス
 【静的地震力】
 水平:1.0Ci (0.2G)
 鉛直: -

現実的な評価

設計の進捗、廃炉活動への影響、供用期間などを考慮した上で、施設・設備に適用する地震動及び必要な対策(耐震性の確保や代替策など)を判断する

施設・設備の特徴に応じた評価

ご清聴ありがとうございます