



令和4年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

# 原子炉建屋の3次元詳細モデルを用いた 地震応答解析手法に関わる標準的解析要領

令和4年11月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 安全研究センター  
耐震・構造健全性評価研究グループ

崔 炳賢

本成果の一部は、原子力規制庁からの受託事業「平成29年度から令和2年度までの原子力施設等防災対策等委託費(高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全評価手法の高度化)事業」の成果である。

# はじめに(1/2)

## 背景

- 新規制基準では、地震等の外部事象評価が厳格化され、**リスク評価を含めた安全性向上評価**に関する運用ガイドが施行された。
- 原子力施設の地震時の安全性を評価する手法として、決定論的な耐震安全性評価と**確率論的地震リスク評価(地震PRA)**に資する地震フラジリティ(地震動の強さに応じた損傷確率)評価がある。
- 耐震安全性評価や地震フラジリティ評価では局部応答・局部損傷を含む**現実的応答・現実的耐力評価**が重要⇒局部応答・局部損傷を表現できる**建屋3次元詳細解析モデル**の活用が期待。

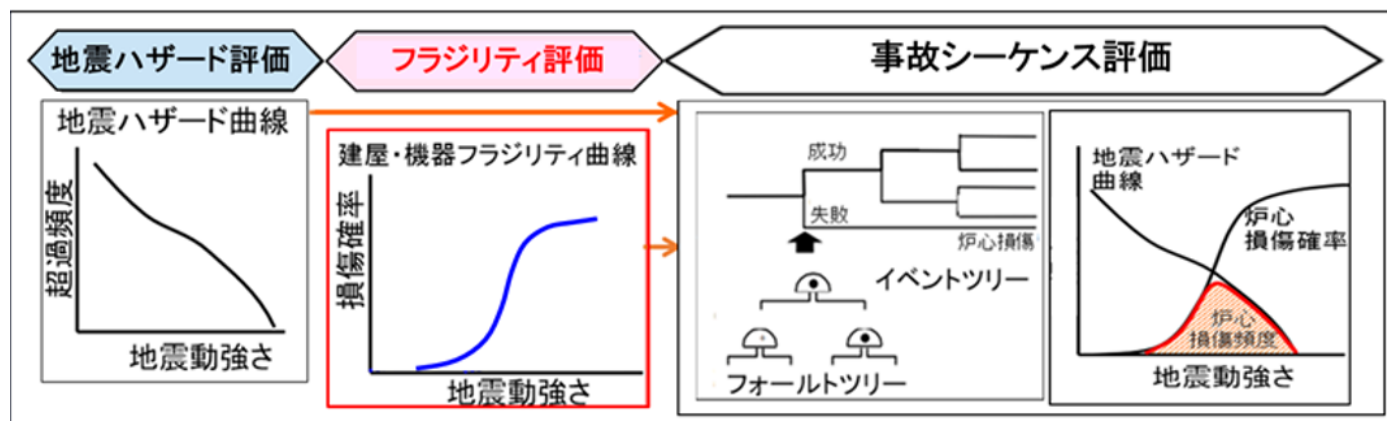


図1 地震PRAの概略図

# はじめに(2/2)

- 原子炉建屋(以下、「建屋」とする。)の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析は、複雑で高度な技術が必要となることから、**解析結果は解析者によりばらつきが大きく(図3)、地震時のゆれの再現性が不十分**という課題。



- 建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析が広く活用されるためには、**モデル化方法や解析方法に係る標準化が必要**。

## 目的

建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析に係る標準的解析要領を整備し、建屋の科学的かつ合理的な耐震評価に資する。

[1] IAEA, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA-TECDOC-1722, 2013.

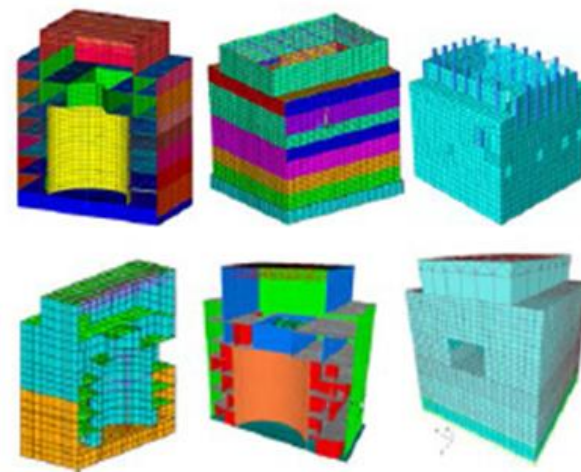


図2 IAEAの国際ベンチマークプロジェクトにおける建屋3次元詳細解析モデル例<sup>[1]</sup>

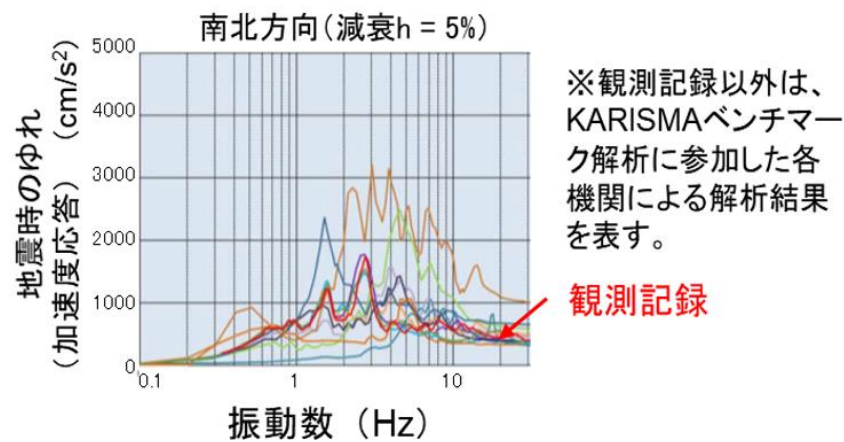


図3 地震時のゆれの比較の例<sup>[1]</sup>  
(建屋3階床)

# 標準化プロセス

文献調査等により、建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析手法に関する複数の**影響因子**を特定



感度解析により、地震時の建屋応答に対して影響が大きい重要な**影響因子**を明らかにし、**各影響因子のモデル化方法を明確化**



地震観測記録と解析結果の比較などを通して**モデル化方法の妥当性を確認**し、建屋の3次元詳細解析モデルを用いた**地震応答解析手法を整備**



上記検討から得られた知見を影響因子ごとに整理し、建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析の実施手順、留意事項、技術的根拠等を取りまとめ、**標準的解析要領**として整備

# 代表的な影響因子

- ①モデル化範囲(建屋内部)
- ②モデル化範囲(建屋周辺・地盤)
- ③水平2方向+鉛直入力
- ④有限要素タイプ(シェル要素、ソリッド要素)
- ⑤芯ずれ
- ⑥鉄骨トラス非線形特性のモデル化
- ⑦鉄筋コンクリート材料のモデル化
- ⑧半無限境界のモデル化
- ⑨建屋と地盤の接合部のモデル化
- ⑩初期応力のモデル化
- ⑪有限要素の精度
- ⑫有限要素メッシュの粗密
- ⑬時間積分法/周波数応答解析の影響
- ⑭減衰のモデル化

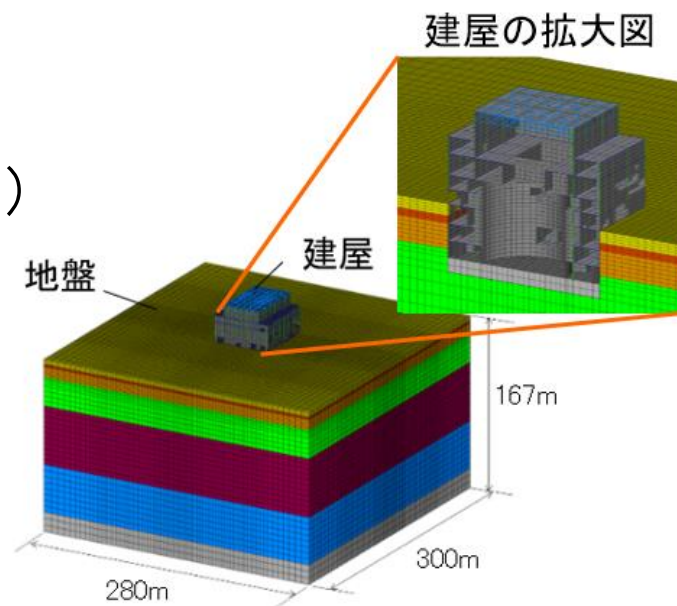


図4 建屋 3次元詳細解析モデルの例

# 影響因子の影響評価例(1/2)

## 「①モデル化範囲（建屋内部）」

建屋の3次元詳細解析モデルの作成においては、非耐震壁、壁・床開口部、階段など、**建屋部材のモデル化範囲の建屋応答への影響**確認が重要

- 耐震壁に加えて非構造壁の追加による影響を評価し、補助壁追加後は床の上下加速度応答が抑制されることを確認
- **解析目的に応じた適切なモデル化範囲**の考慮が必要

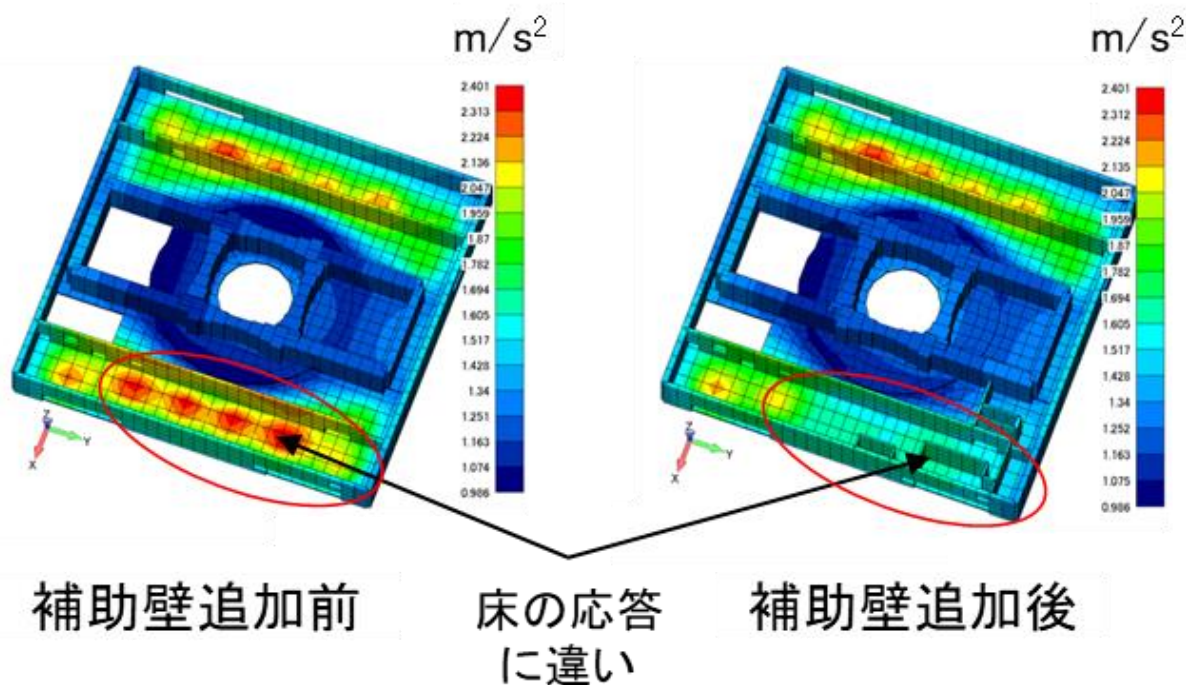


図5 補助壁の影響確認(3F、上下方向)

# 影響因子の影響評価例(2/2)

## 「⑨建屋と地盤の接合部のモデル化」

大きな地震動による地震応答解析においては、**建屋と地盤の接合部(境界部)**のモデル化による建屋応答への影響確認が重要

- 地盤-建屋間に非線形ジョイント要素を導入することで、接触・剥離を再現
- 設計を超えるような地震に対しては**非線形相互作用の適切なモデル化**が必要

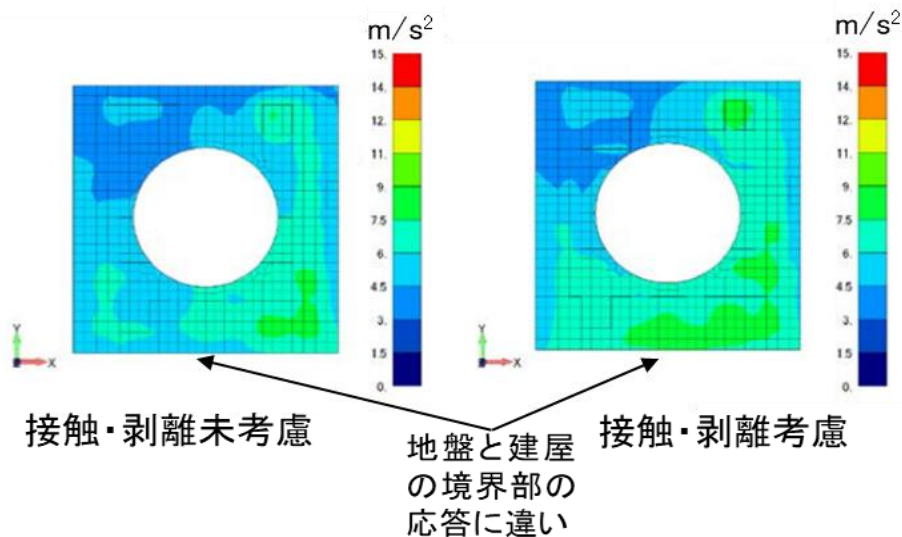


図6 地盤と建屋の境界部における接触・剥離の影響確認(B1F)

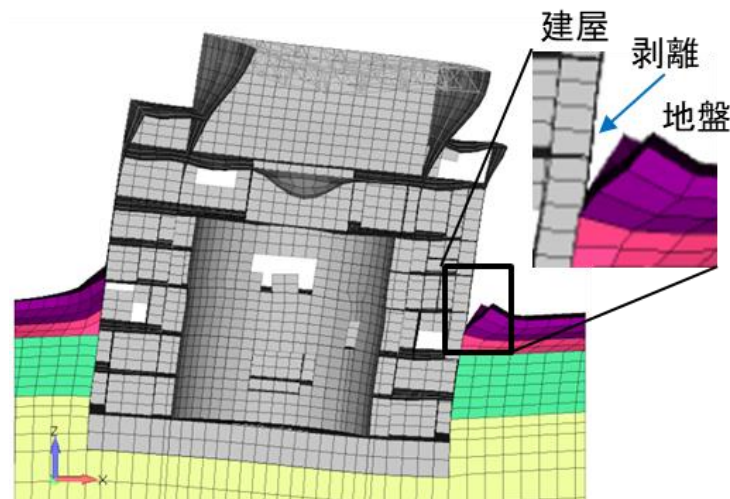


図7 地盤と建屋の境界部における接触・剥離の計算例

### 各影響因子のモデル化方法を明確化

→地震観測記録と解析結果の比較などを通してモデル化方法の妥当性を確認し、建屋の3次元詳細解析モデルを用いた**地震応答解析手法を整備**

# 標準的解析要領の整備

以上の解析検討から得られた知見を影響因子ごとに整理し、**建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析の実施手順、推奨事項、留意事項、技術的根拠**等を取りまとめ、標準的解析要領として整備し、外部専門家の確認も得て公開。

- 本解析要領は、本文及び解説、別紙1の附属書(影響因子の感度解析結果等)、別紙2(適用事例)で構成されている。
- 本解析要領の対象は、BWR型及びPWR型双方の建屋とし、フラジリティ評価における建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析に適用するものとする。

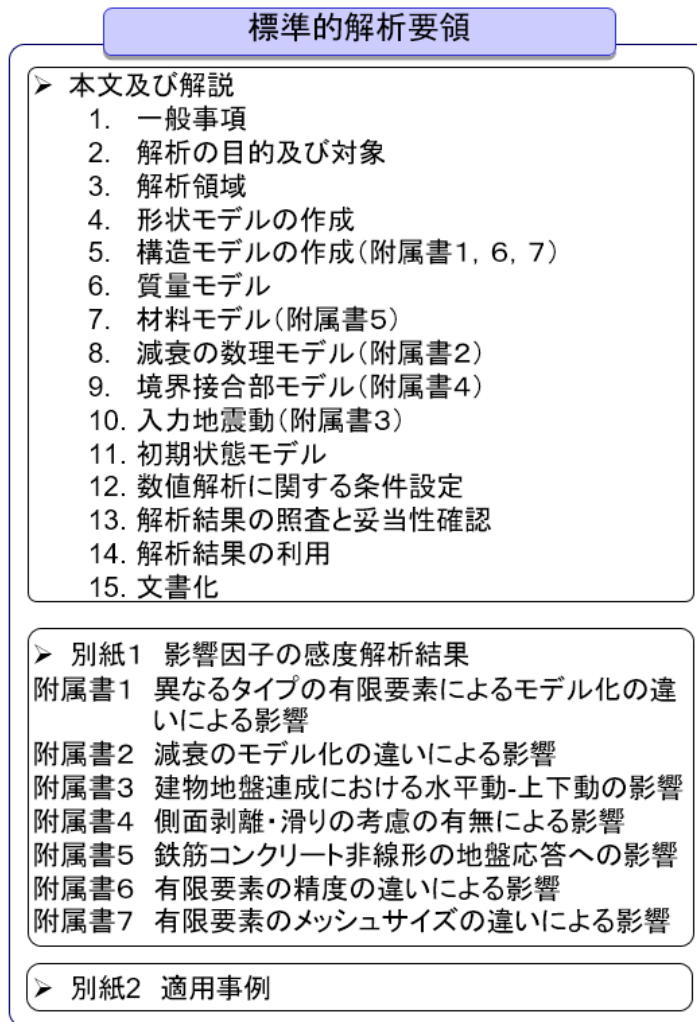


図8 標準的解析要領の構成



# 標準的解析要領の構成 (1/2)

## 標準的解析要領

### 1. 一般事項

本要領の構成、適用範囲、用語

### 2. 解析の目的及び対象

解析目的、解析方法、単位系、解析計画

### 3. 解析領域 (図9)

建物・周辺地盤の詳細度、モデル対象範囲

### 4. 形状モデルの作成 (図10)

建物・地盤の形状 (CAD) モデルの作成

### 5. 構造モデルの作成 (附属書1, 6, 7)

有限要素タイプの違い、有限要素メッシュの精度

### 6. 質量モデル

質量の有限要素モデル (集中質量、分布質量)

### 7. 材料モデル (附属書5)

鉄筋コンクリート、鉄骨、鉄骨鉄筋コンクリート、地盤、材料減衰

### 8. 減衰の数理モデル (附属書2) (図11)

減衰タイプ (レーリー減衰、複合減衰、複合モード減衰)

## 適用事例

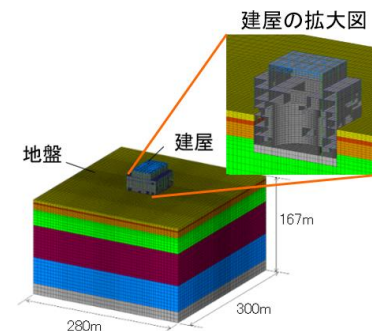


図9 建屋 3次元詳細解析モデルの例

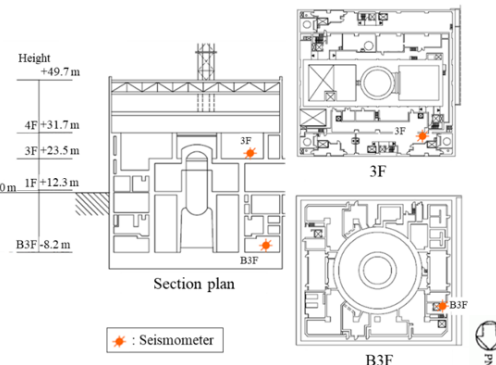


図10 建屋の断面図と平面図

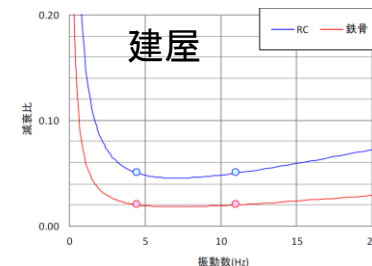


図11 減衰モデルの例 (レーリー減衰)

# 標準的解析要領の構成 (2/2)

## 標準的解析要領

### 9. 境界接合部モデル(附属書4)

埋め込まれた建物と地盤の接合部、建物の部材同士の接合、解析地盤領域の底面及び側面境界

### 10. 入力地震動(附属書3)(図12)

解放基盤で設定された地震動

### 11. 初期状態モデル

自重モデル、熱応力モデル

### 12. 数値解析に関する条件設定

有限要素の精度、地震応答解析法、非線形解析法

### 13. 解析結果の照査と妥当性確認(図13)

正常終了確認、入力データの確認、解析内容の照査、解析結果の妥当性確認

### 14. 解析結果利用(図14)

非線形解析における解析結果の利用、解析結果のばらつきの考慮法(構造解析係数)、ピアチェック

### 15. 文書化

## 適用事例

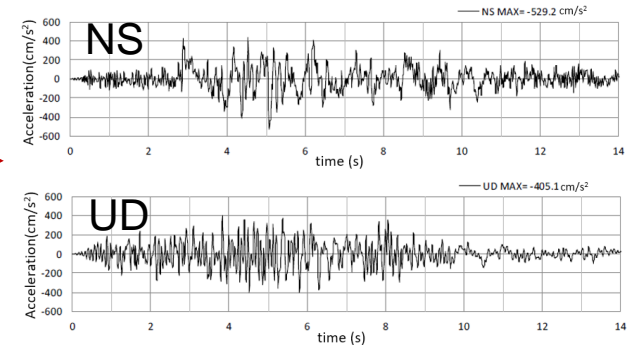


図12 解析モデル底面の入力地震動の例

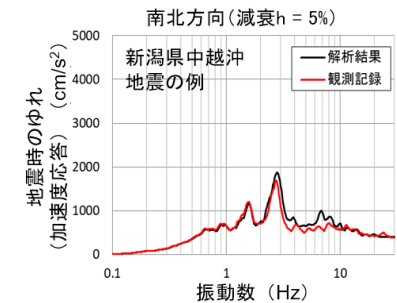
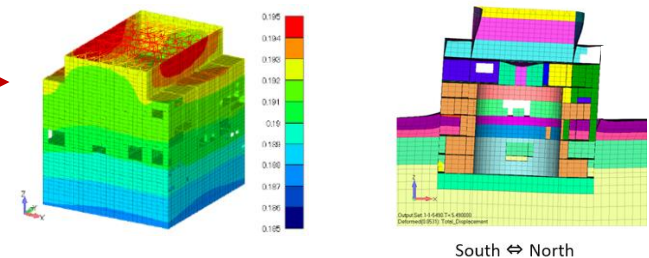


図13 加速度応答スペクトルの例 (h=5%, 3F)



最大変位

建屋と地盤の変形図

図14 解析結果の例

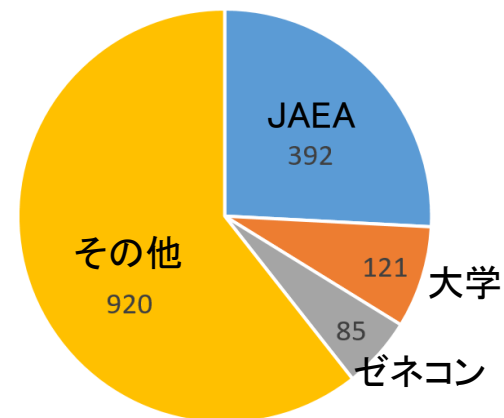
# まとめ

- 地震時の建屋応答に対して影響が大きい重要な影響因子を明らかにし、各影響因子のモデル化方法を明確にすることで、原子力施設の建屋を対象として**3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析手法を整備**した。
- 建屋の3次元詳細解析モデルを用いた地震応答解析のためのモデル化範囲、モデル化方法や考え方、その根拠となる解析例や資料などを取りまとめ、**標準的な解析要領として整備**し、外部専門家の確認も得て公開 (JAEA-Research-2021-017)。
- 本解析要領の普及により建屋の3次元詳細解析モデルによる**地震応答解析手法の信頼性向上**につながることが期待される。

今後は、本解析要領の英文版を発行するとともに、継続して最新知見を反映し、適宜改訂を行う予定である。



図15 機構の研究開発報告書(JAEA-Research-2021-017)



ダウンロード総数: 1518回  
(2022年3月~10月)

図16 ダウンロード内訳 11