

1号機燃料取り出し用カバーのうち 大型カバーの設置について

2022年4月7日（第12回）

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

大型カバー設置工事のうちアンカー設置工事等の開始について

- 大型カバーについてはこれまで、大型カバーを支持する原子炉建屋外壁の調査や新耐震方針を踏まえた耐震評価を進めてきたが、これらが大型カバー設計へ及ぼす影響がない見通しが立ったことから、大型カバー設置工事の内不可逆的な要素のないアンカー設置工事等を2022年4月より開始する。
- これまで実施した評価の項目と見通しは以下の通り。
 - ① Ss900による耐震評価を踏まえた大型カバーの耐震クラスについて
添付資料-3,5参照
 - Ss900Gal3方向入力による大型カバーの耐震評価を行い、一部アンカーを増やすことで倒壊に至らないことを確認した。
 - ② 大型カバーを付加した原子炉建屋の耐震性について
添付資料-5参照
 - 原子炉建屋へ大型カバーの重量を付加した状態での900galの評価を行い、崩壊に至らないことを確認した。
 - ③ 原子炉建屋外壁にアンカー削孔を行うことによる外壁耐震性について
添付資料-4参照
 - 原子炉建屋外壁にアンカー削孔を行ったとしても、外壁の耐震性に与える影響が軽微であることを確認した。
 - ④ 大型カバーを支持する原子炉建屋外壁の調査について
本資料参照
 - 原子炉建屋外壁の代表箇所を調査し、大型カバーの設計や原子炉建屋の耐震性に影響を及ぼすような損傷や強度の低下がないことを確認した。なお、幅1mmを超えるひび割れについては、エポキシ補修もしくはアンカー位置をひび割れと干渉しない位置へ見直す。
 - ⑤ 作業者の被ばく線量低減について
 - 大型カバー設置工事について遠隔操作や鉄骨の大組、仮設遮蔽の設置等を行うことで作業者の被ばく線量を低減し、計画線量は約6,554人・mSvと計画した。

はじめに

- 1号機大型カバーの設置に伴い、実施計画の下記の範囲について変更を申請する。

- 実施計画の申請範囲

<変更箇所>

Ⅱ 特定原子力施設の設計，設備

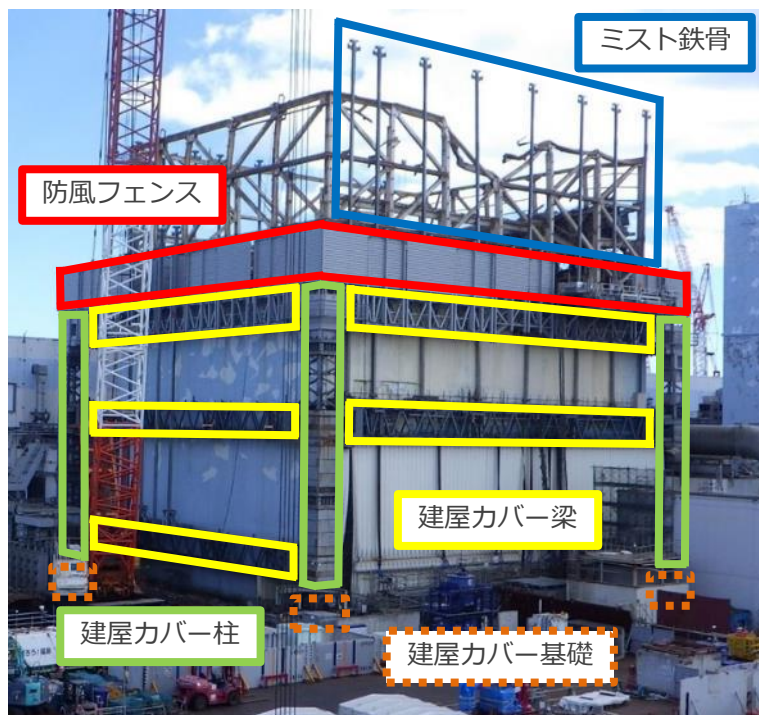
2 特定原子力施設の構造及び設備，工事の計画

2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備

添付資料－4－2 燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書

添付資料－6 福島第一原子力発電所第1号機原子炉建屋カバーに関する説明書

- 1号機の燃料取り出しに当たっては、ダスト飛散対策の信頼性向上等の観点から、「原子炉建屋を覆う大型カバーを設置し、カバー内でガレキ撤去を行う」プランを採用し、2020年2月に第78回監視・評価検討会にて説明した。
- その後、大型カバーの設計を進めると共に、大型カバーの設置に向けて支障となる既存の原子炉建屋カバーの残置部について、2020年12月より撤去を実施し、2021年6月に完了した。
- 今回は、大型カバーの設計内容について申請する。なお、大型カバー設置以降については、別途申請予定である。



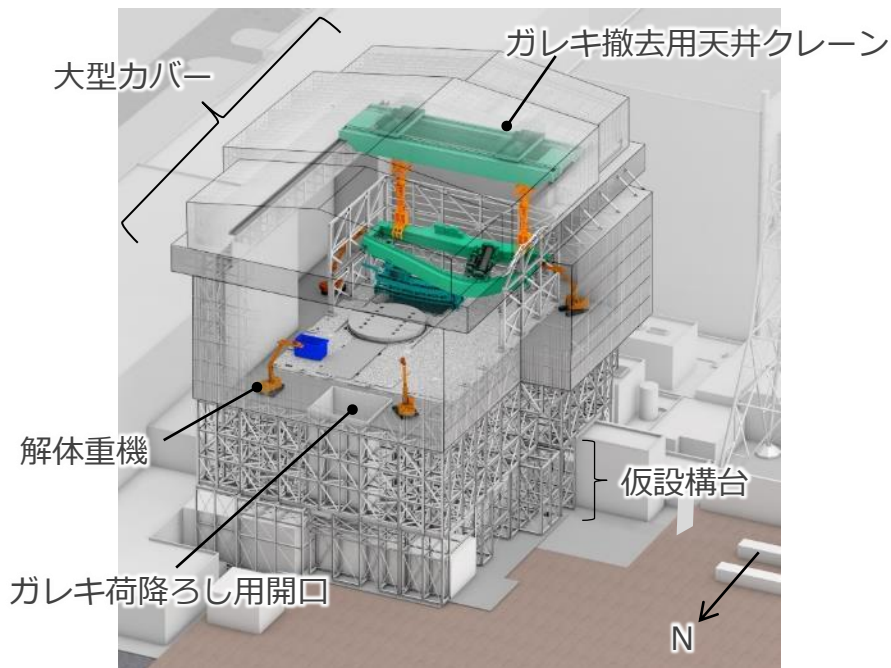
1号機原子炉建屋全景（2020年3月時点）



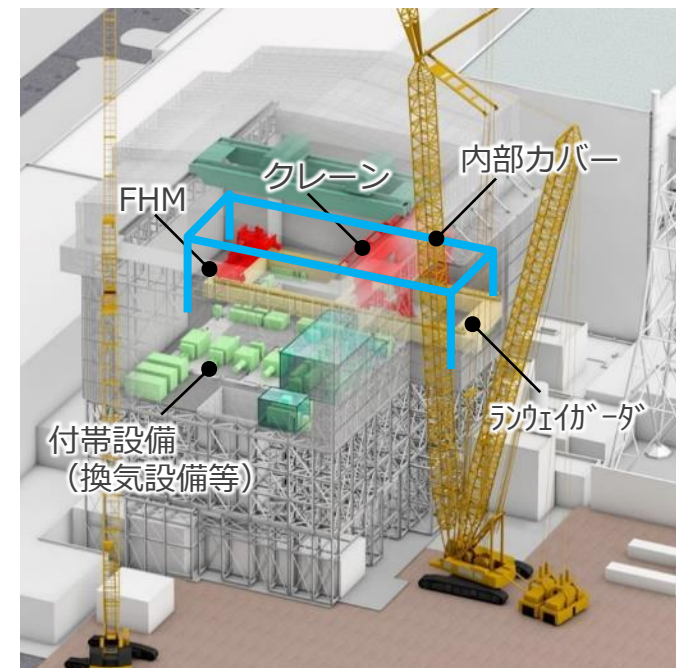
1号機原子炉建屋全景（2021年6月19日時点）

燃料取り出し工法の概要

- 原子炉建屋を覆う大型カバーを先行設置し、大型カバー内のガレキ撤去用天井クレーンや解体重機を用いて、ガレキ撤去を実施する。
- その後、オペレーティングフロアの除染・遮蔽を実施し、燃料取扱設備(燃料取扱機、クレーン)を設置した上で、使用済燃料プールから燃料取り出しを実施する。



ガレキ撤去時のイメージ図



燃料取り出し時のイメージ図

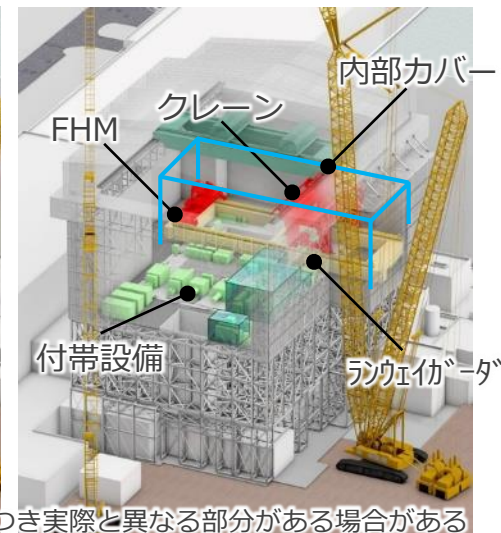
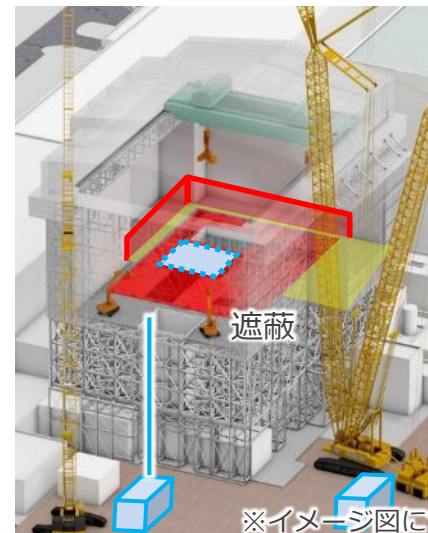
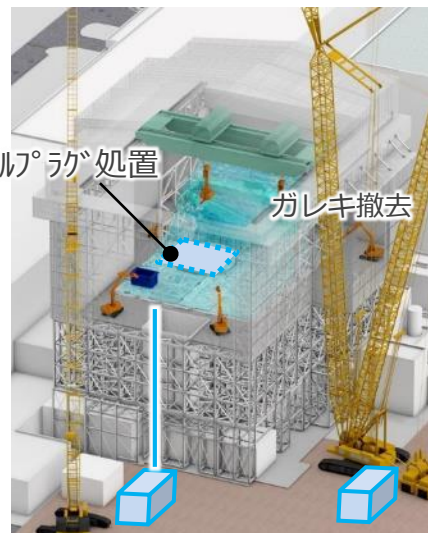
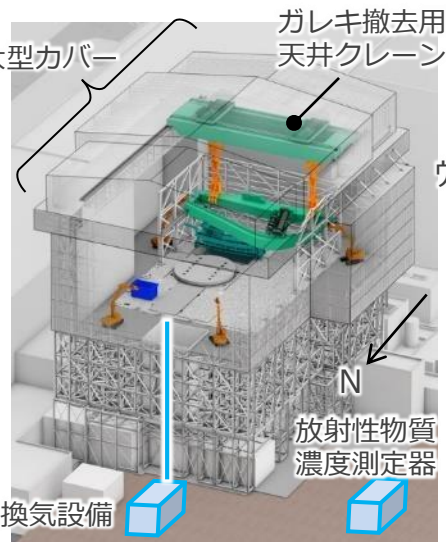
※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

燃料取り出しに向けた実施計画の提出方法 (1)

- STEP毎に実施計画を提出する計画である。
- 大型カバーは、設置後ガレキ撤去に使い、その後、燃料取り出し時にも活用する。なお、内部カバーはガレキ撤去後設置するため、別途申請予定である。

大型カバー設置完了
(2023年度頃)

燃料取り出し開始
(2027~2028年度)



※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

STEP1-1

- ・大型カバー
- ・ガレキ撤去用天井クレーン

STEP1-2

- ・換気設備
- ・放射性物質濃度測定器
- ・非常用注水設備の代替手段

STEP2

- ・ガレキ撤去
- ・ウェルプラグ処置

STEP3

- ・遮蔽

STEP4

- ・FHM, クレーン
- ・換気設備
- ・放射性物質濃度測定器
- ・エリア放射線モニタ
- ・ランウェイガード, 内部カバー

今回申請範囲

対象設備

燃料取り出しに向けた実施計画の提出方法 (2)

■ 各STEPの実施計画変更予定範囲を以下に示す。

項目	STEP 1-1	STEP 1-2	STEP 2	STEP 3	STEP 4	STEP 5
II 2.3 使用済燃料プール設備	-	○	-	-	-	-
添付資料-9 使用済燃料プール冷却系機能喪失評価	-	○	-	-	-	-
II 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備	○	○	○	○	○	○
添付資料-1-1 燃料の落下防止, 臨界防止に関する説明書	-	-	-	-	○	-
添付資料-1-2 放射線モニタリングに関する説明書	-	-	-	-	○	-
添付資料-1-3 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書	-	-	-	-	○	○
添付資料-2-1 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書	-	-	-	-	-	○
添付資料-2-2 破損燃料用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書	-	-	-	-	-	○
添付資料-2-3 構内輸送時の措置に関する説明書	-	-	-	-	-	○
添付資料-3-1 放射性物質の飛散・拡散を防止するための機能に関する説明書	-	○	-	-	○	-
添付資料-3-3 移送操作中の燃料集合体の落下	-	-	-	-	○	-
添付資料-4-1 燃料取扱設備の構造強度及び耐震性に関する説明書	-	-	-	-	○	-
添付資料-4-2 燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書	○	-	-	○	○	-
添付資料-5 使用済燃料プールからの燃料取り出し工程表	-	-	-	-	○	-
添付資料-6 福島第一原子力発電所第1号機原子炉建屋カバーに関する説明書	○	-	-	-	-	-
添付資料-7 福島第一原子力発電所第1号機原子炉建屋カバー解体について	-	○	-	-	-	-
添付資料-10 福島第一原子力発電所1号機原子炉建屋パレーティングドアのガレ撤去について	-	-	○	-	-	-
II 2.15 放射線管理関係設備等	-	○	-	-	○	-
添付資料-1 ダスト放射線モニタシステム概略図	-	○	-	-	○	-
III 第1編 第34条 新燃料の運搬	-	-	-	-	-	○
III 第1編 第36条 使用済燃料の貯蔵	-	-	-	-	-	○
III 第1編 第37条 使用済燃料の運搬	-	-	-	-	-	○
III 第1編 第42条 気体廃棄物の管理	-	○	-	-	○	-
III 第1編 第60条 外部放射線に係る線量当量率等の測定	-	-	-	-	○	-
III 第1編 第61条 放射線計測器類の管理	-	-	-	-	○	-
III 第3編 2.1.3 放射性気体廃棄物等の管理	-	○	○	-	○	-
III 第3編 3.1.2 放射線管理	-	○	○	-	○	-

各申請の関係性の整理 (STEP1-1 大型カバーについて)

- 大型カバーの設計 (STEP1-1) では、表に示すように各STEPにおける条件を反映している。これらについては、STEP1-1で説明する。
- 設備の設計やガレキ撤去の方法などは各STEPで詳細を説明する。
- 各STEPの条件が変更となった場合、STEP1-1に与える影響があるかどうかを確認する。

	STEP1-2	STEP2	STEP3	STEP4
ガレキ撤去時	[換気設備] ・大型カバーの荷重へ反映 [放射性物質濃度測定器] ・大型カバーの荷重へ反映 [非常用注水設備代替手段] ・大型カバーの荷重へ反映	[ガレキ撤去] ・重機を大型カバーの荷重へ反映 ・ガレキをR/Bの荷重へ反映 [ウェルプラグ処置] ・R/Bの荷重として反映	[遮蔽] ・遮蔽体を大型カバーの荷重へ反映	・反映事項なし
燃料取り出し時	[換気設備] ・大型カバーの荷重へ反映 [放射性物質濃度測定器] ・大型カバーの荷重へ反映 [非常用注水設備代替手段] ・大型カバーの荷重へ反映	[ガレキ撤去] ・ガレキの荷重を全て除外 [ウェルプラグ処置] ・R/Bの荷重として反映	[遮蔽] ・大型カバー, R/Bそれぞれの荷重へ反映	[FHM, クレーン] ・R/Bの荷重へ反映 ・大型カバーへ反力を反映 [換気設備] ・R/Bの荷重へ反映 [放射性物質濃度測定器] ・R/Bの荷重へ反映 [エリア放射線モニタ] ・R/Bの荷重へ反映 [ランウェイガード] ・R/Bの荷重へ考慮 ・大型カバーへ反力を反映 [内部カバー] ・R/Bの荷重へ考慮 ・大型カバーへ反力を反映

燃料取り出しに向けた実施計画の提出方法 (3)

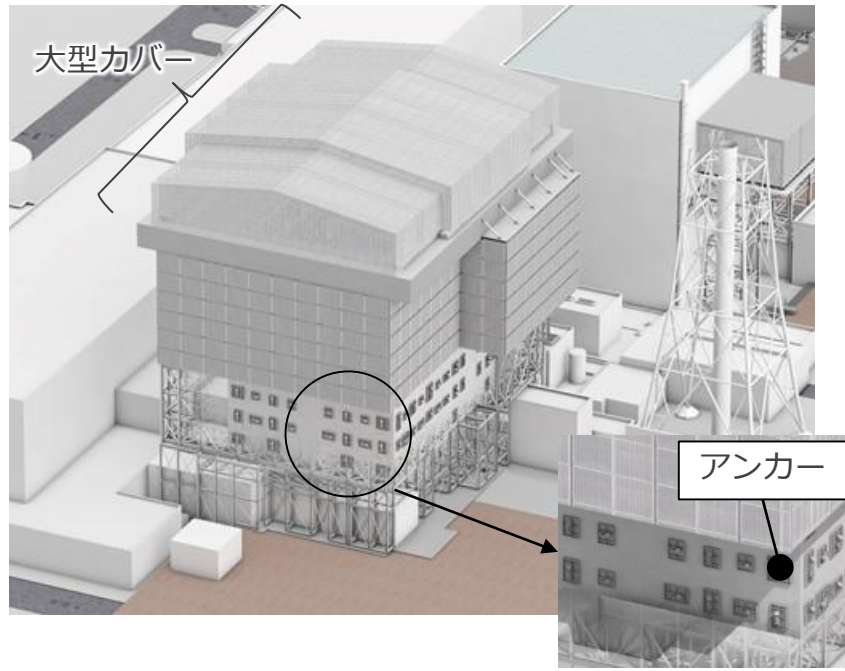
■ 各STEPの申請スケジュールを以下に示す。

年度	21	22	23	26	32	
RMマイルストーン			1号機大型カバーの設置完了 (2023年度頃) ▽	1号機燃料取り出し開始 (2027~2028年度) ↔	燃料取り出し完了 (2031年内)	
廃炉中長期実行プラン 2021						
許認可	▽STEP1-1 (2021年6月~)	▽STEP1-2 (2021年8月~)	▽STEP2 (2023年度)	▽STEP3 (2024年度)	▽STEP4 (2022年度)	▽STEP5 (2024年度)

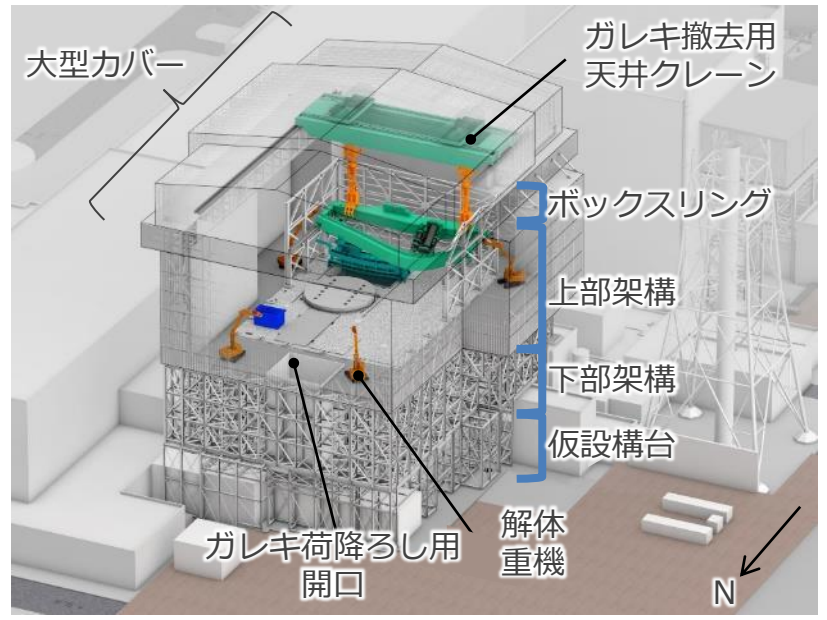
大型カバー等の設置について（1）

大型カバーの概要は以下の通り。

- ガレキ撤去環境構築，ダスト飛散の更なる抑制，雨水流入防止のため原子炉建屋オペフロ全体を覆う構造物。
- 原子炉建屋にアンカーで支持されている鉄骨造の構造物。
- 大型カバーは，燃料取扱設備支持部とそれ以外の部分（以下，「一般部」という）から構成される。
- 内部にガレキ撤去を実施するためのガレキ撤去用天井クレーンを有する。



大型カバー全体の概要図

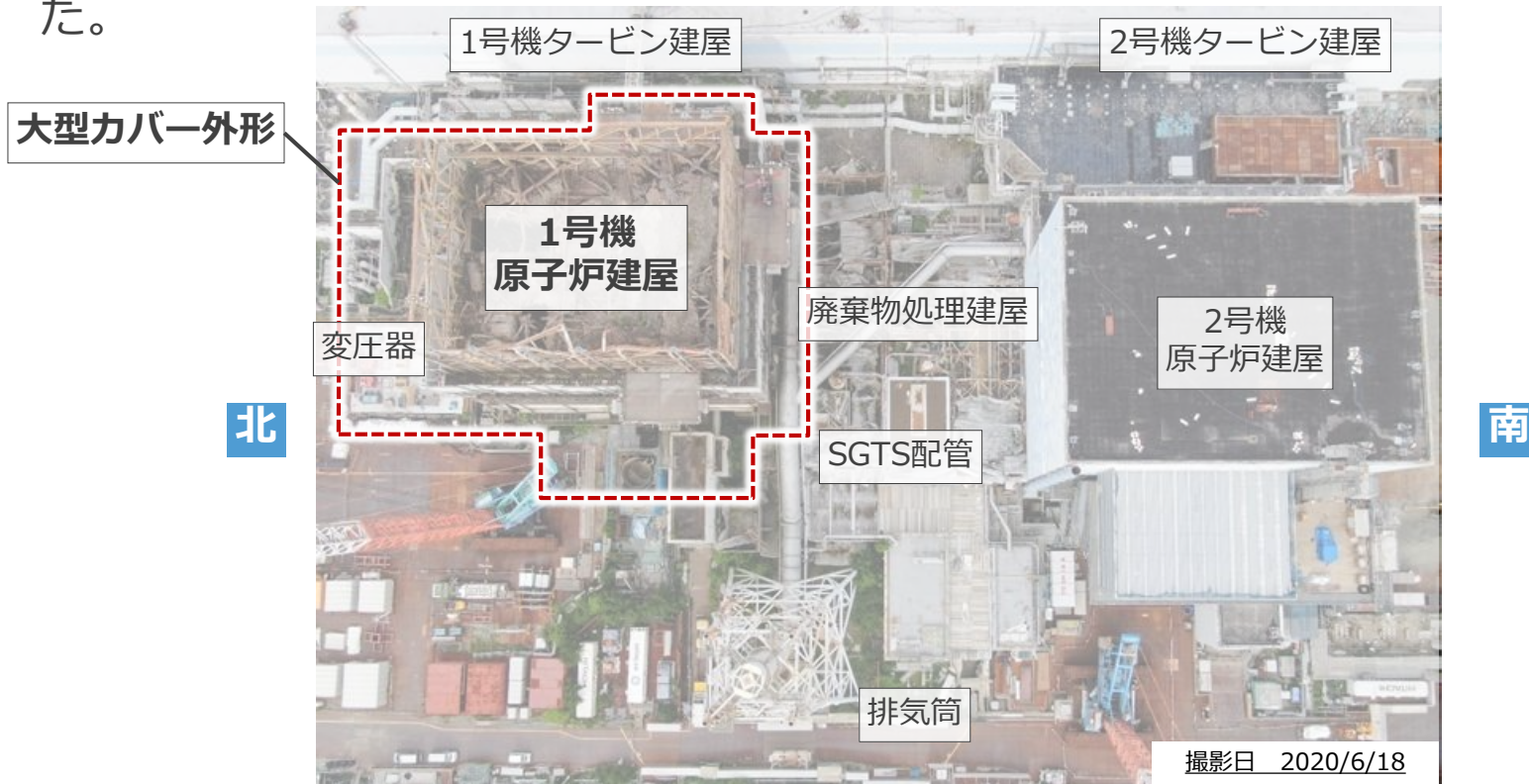


ガレキ撤去時のイメージ図

※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

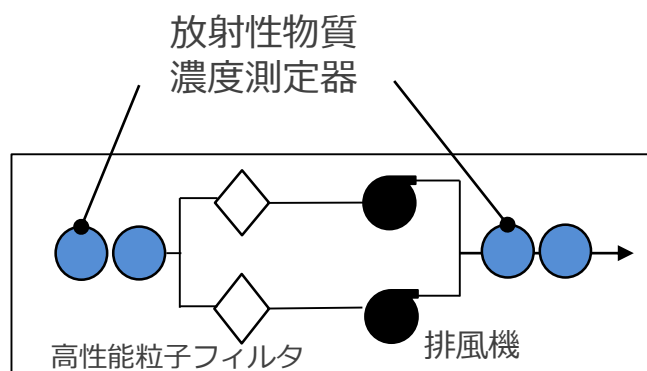
大型カバーを外壁支持とした経緯

- 1号機の燃料取り出しに当たっては、ダスト飛散対策の信頼性向上等の観点から、「原子炉建屋を覆う大型カバーを設置し、カバー内でガレキ撤去を行う」プランを採用し、2020年2月に第78回監視・評価検討会にて説明した。
- 大型カバーはガレキ撤去を行うために原子炉建屋全体を覆う必要があり、原子炉建屋より大きな構築物となる。このため、地盤から支持する場合、周辺建屋（タービン建屋、廃棄物処理建屋など）や設備の解体並びに支持力を確保するため地盤改良等が必要となることから、原子炉建屋外壁から支持することとした。

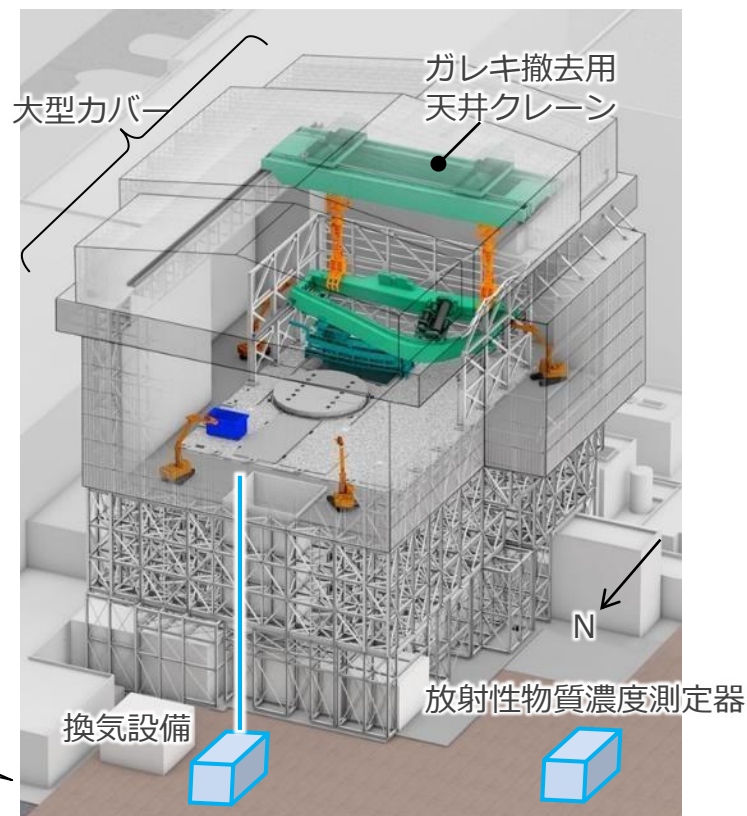


大型カバー等の設置について（2）

- 大型カバーの設置とあわせて、換気設備、放射性物質濃度測定器等を設置する。
- 大型カバーは、合理的に可能な限り隙間を低減し、換気設備とあいまって放射性物質の大気への放出を抑制するとともに、放射性物質濃度測定器により連続監視する。



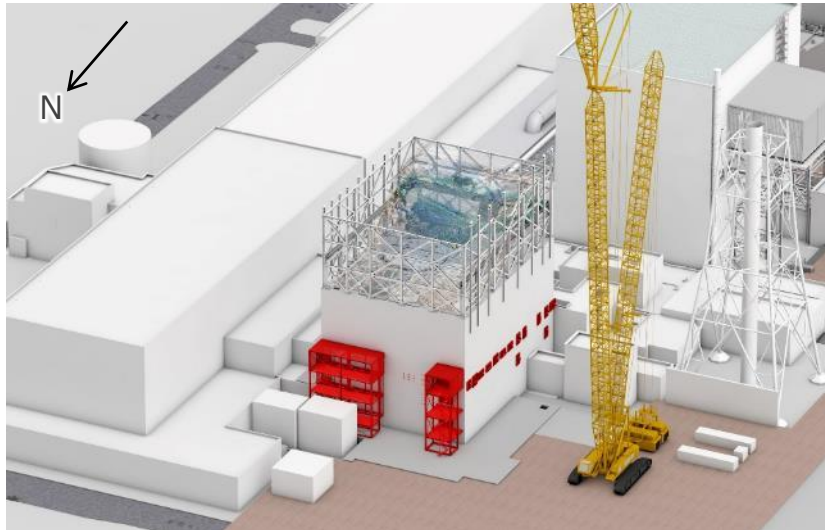
※大型カバー外周部にも自主的に放射性物質濃度測定器を設置



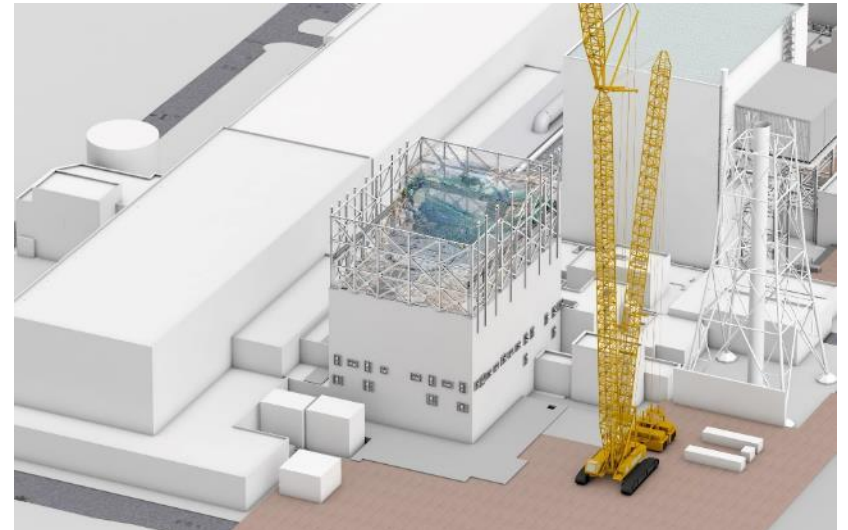
※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

大型カバー等の設置について (3)

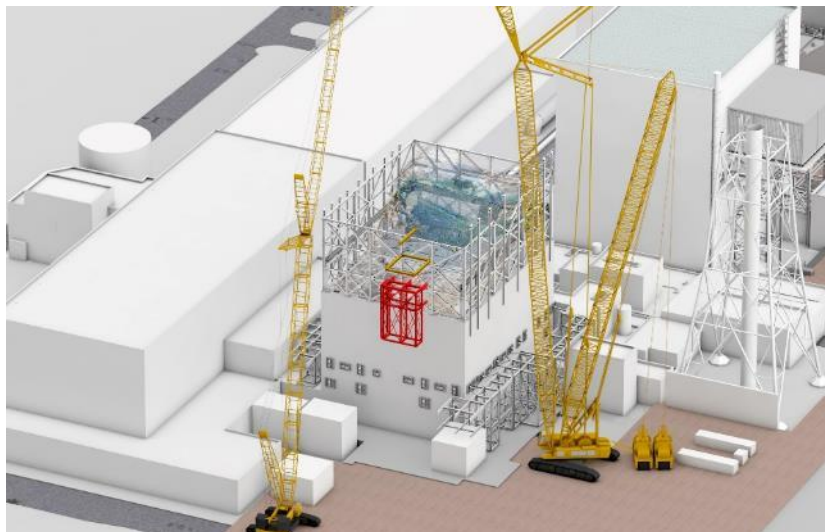
■ 大型カバー設置の作業ステップ (1)



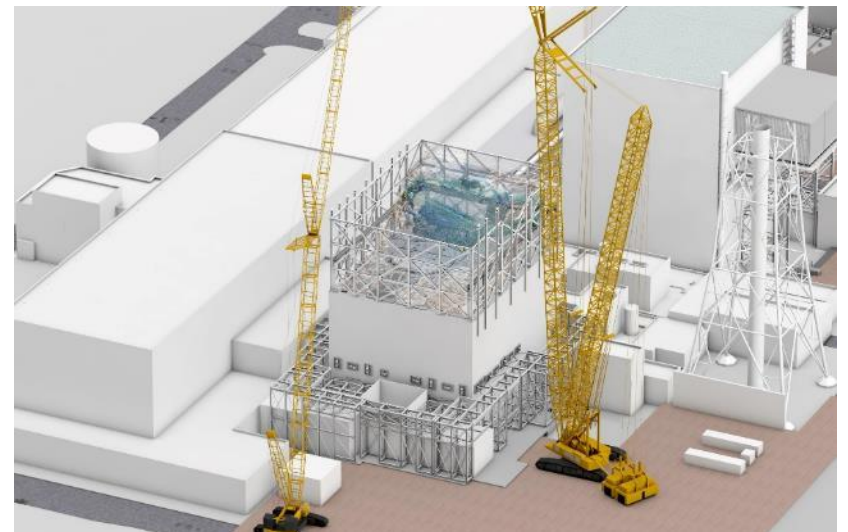
仮設構台部アンカー削孔, ベースプレート設置中



仮設構台部アンカー削孔, ベースプレート設置完了



仮設構台設置中

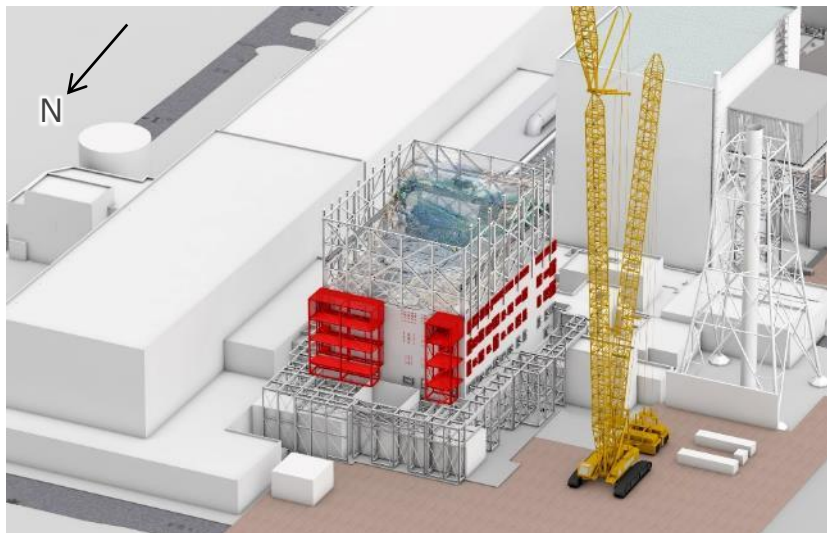


仮設構台設置完了

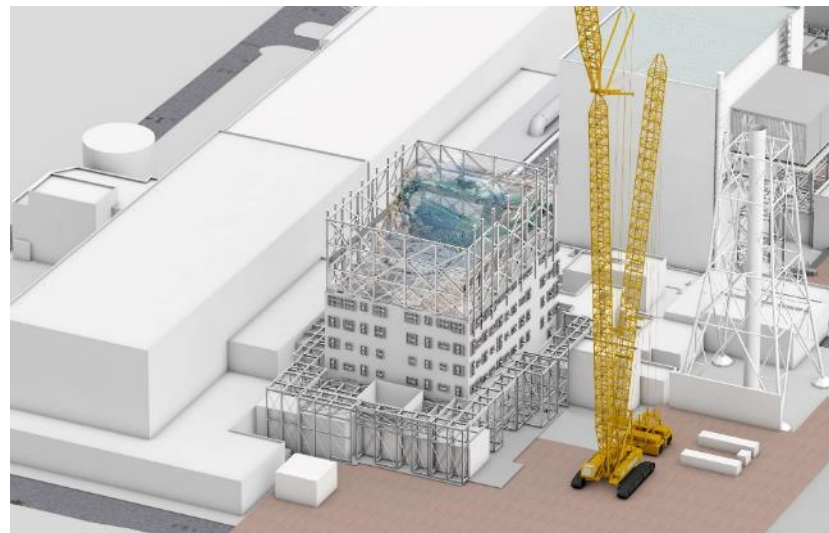
※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

大型カバー等の設置について (4)

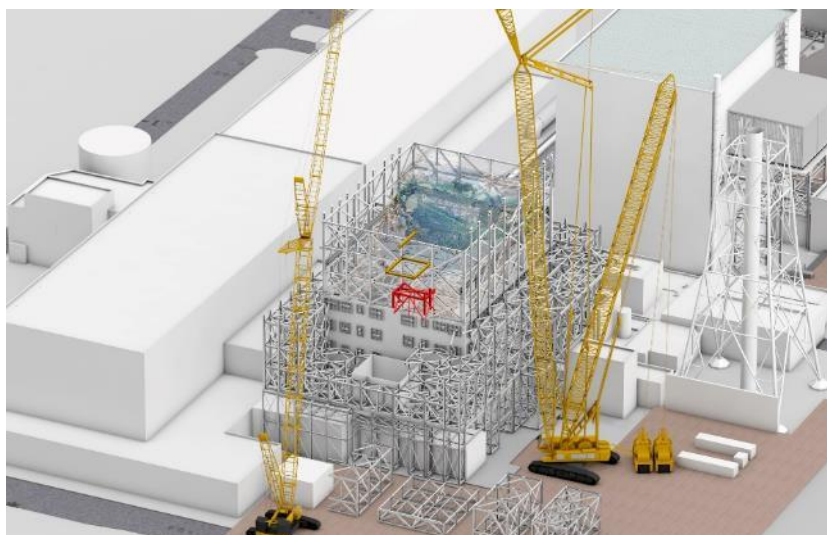
■ 大型カバー設置の作業ステップ (2)



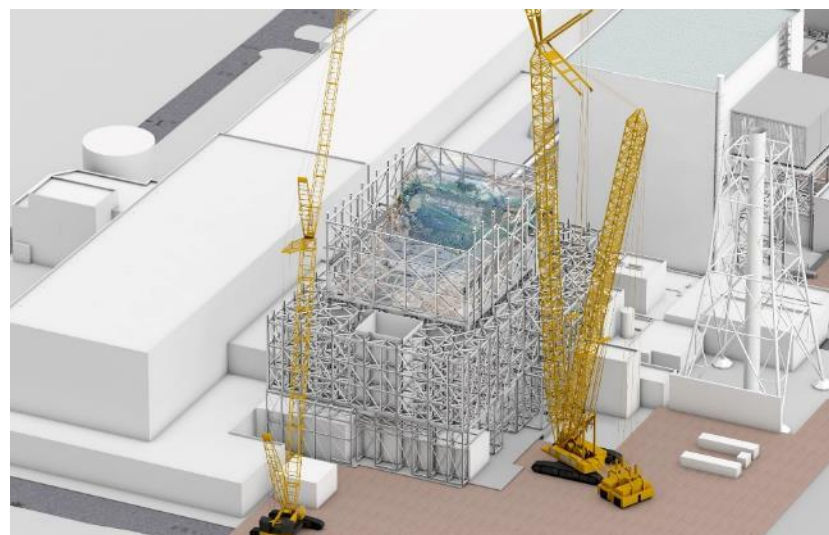
アンカー削孔, ベースプレート設置中



アンカー削孔, ベースプレート設置完了



下部架構設置中

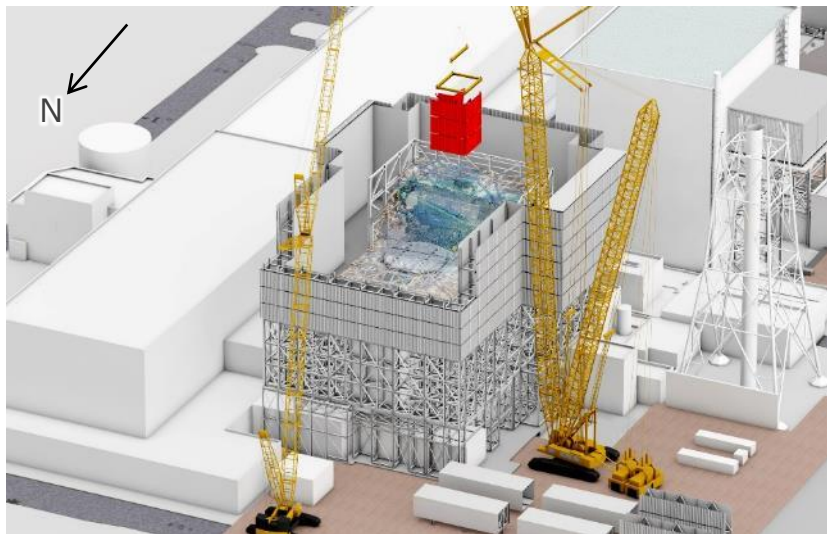


下部架構設置完了

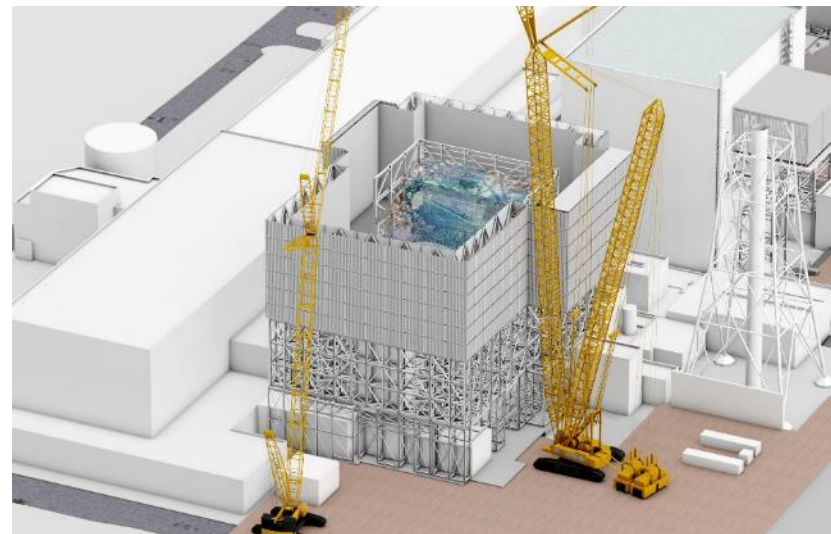
※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

大型カバー等の設置について (5)

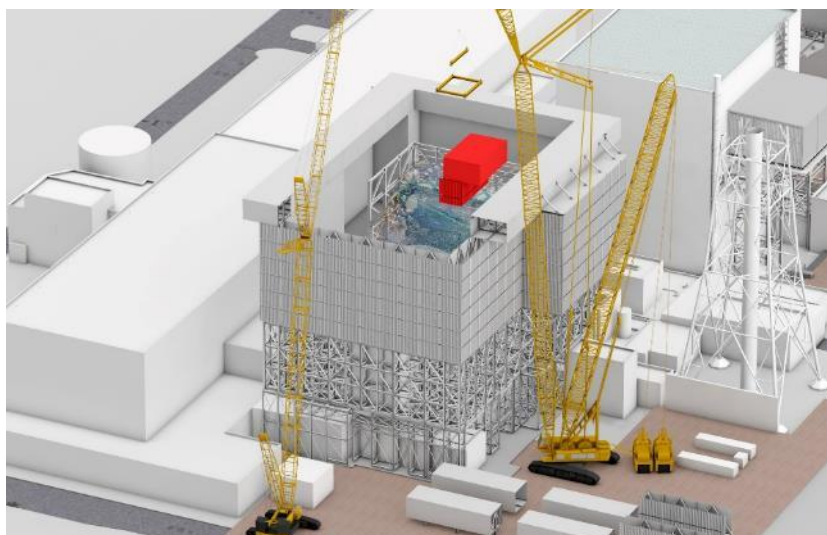
大型カバー設置の作業ステップ (3)



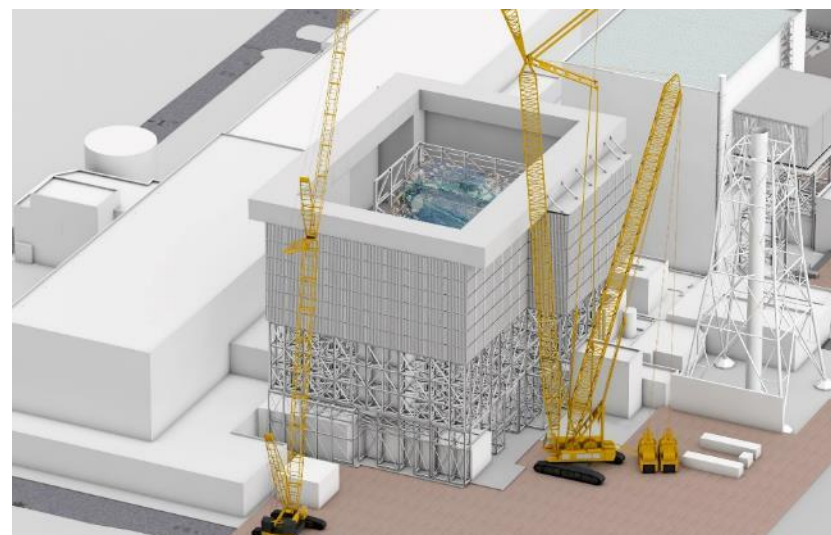
上部架構設置中



上部架構設置完了



ボックスリング設置中

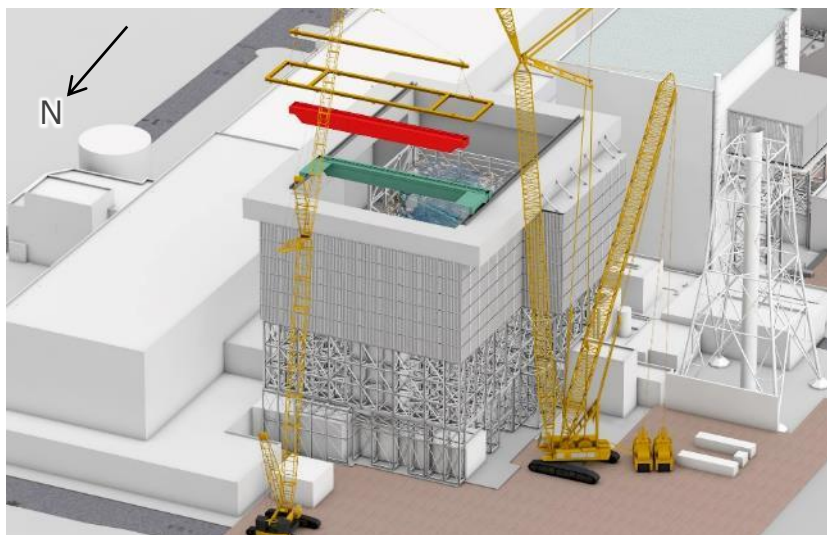


ボックスリング設置完了

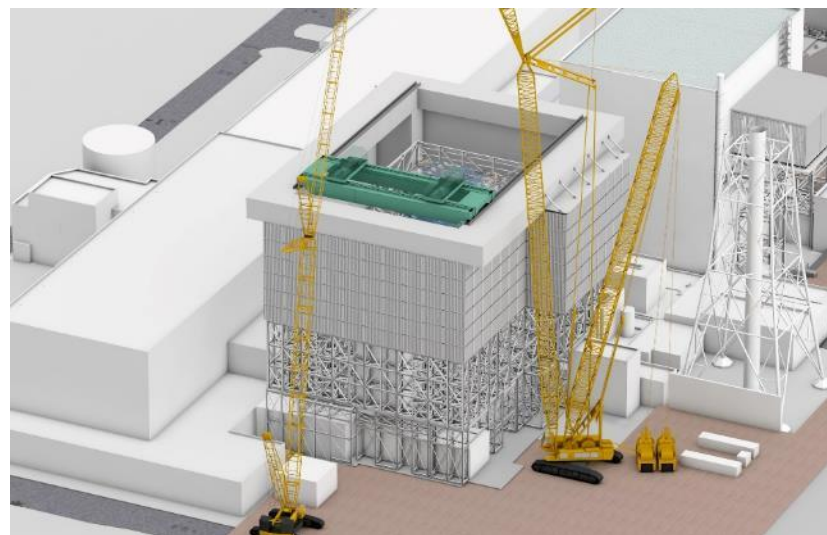
※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

大型カバー等の設置について (6)

大型カバー設置の作業ステップ (4)



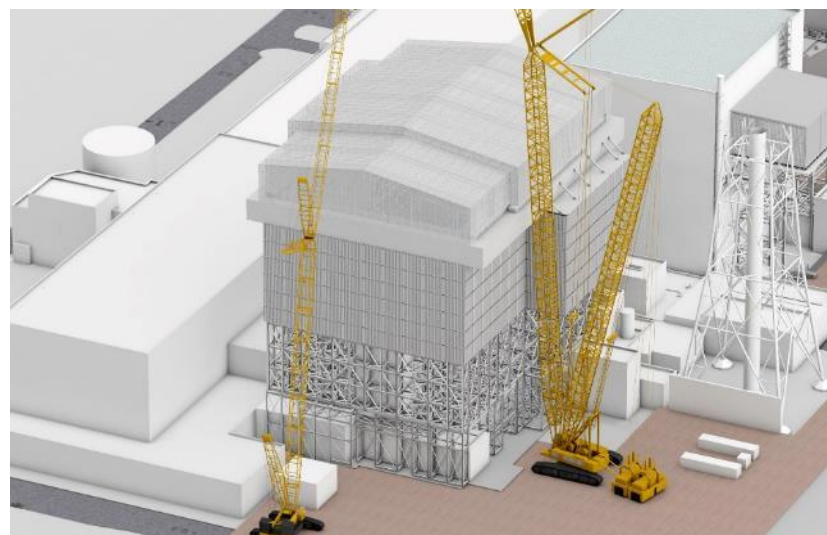
ガレキ撤去用天井クレーン設置中



ガレキ撤去用天井クレーン設置完了



可動屋根設置中

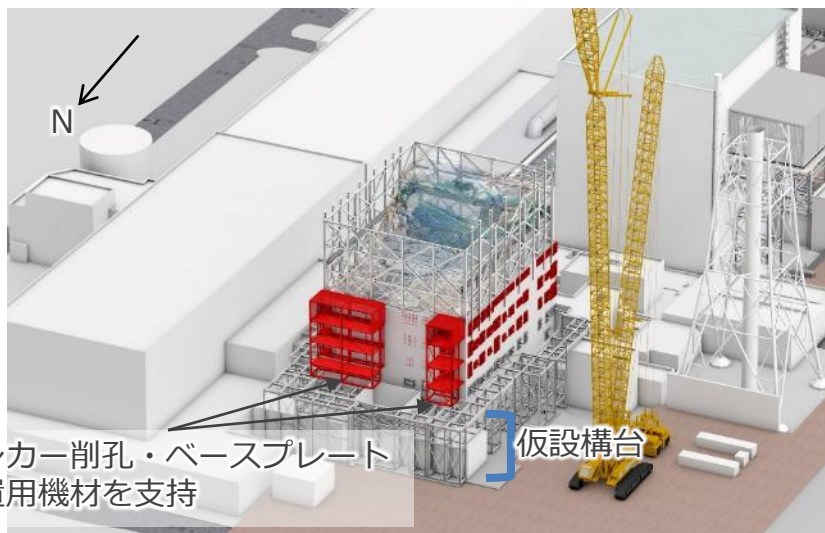


可動屋根設置完了

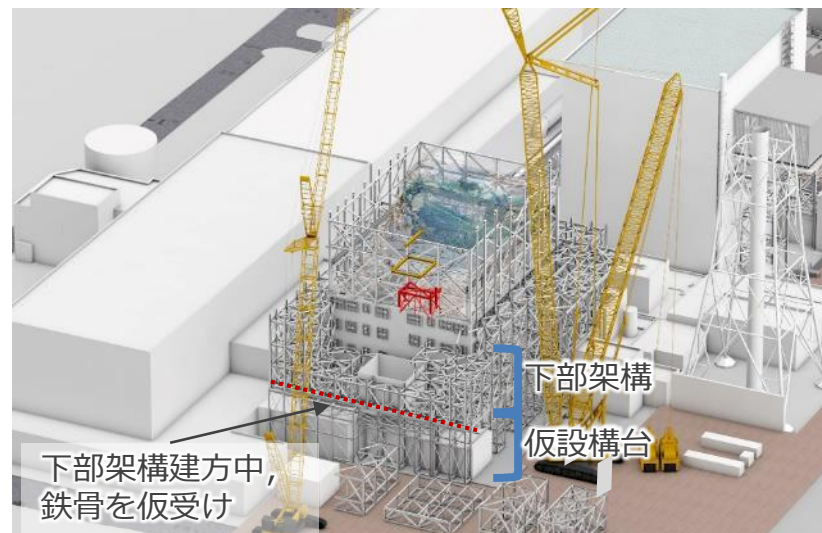
※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

大型カバー等の設置について (7)

- 仮設構台は地上から立ち上げ、アンカー削孔やベースプレート設置中の機材の支持や、下部架構建方中の鉄骨を仮受けするために設けるものである。
- 下部架構とは構造的に縁が切れており、大型カバーを構成する構造部材とはならないため、申請対象の構造物とはしていない。



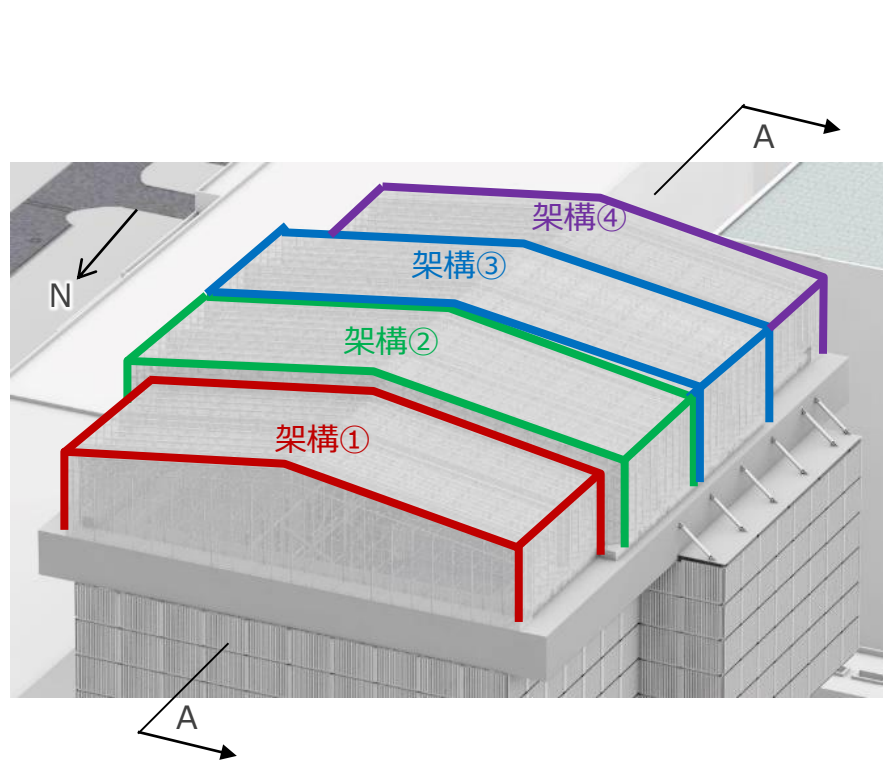
アンカー削孔、ベースプレート設置中



下部架構設置中

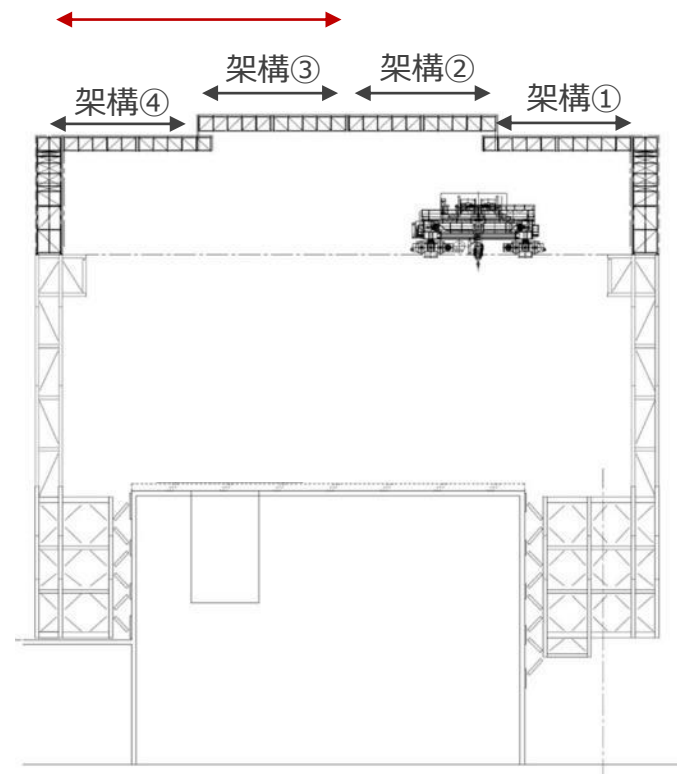
大型カバー等の設置について (8)

- 可動屋根は大小4つの架構に分かれており、それぞれの架構が南北にスライドし、任意の位置で屋根面積の約50%を開口できる構造である。これにより、将来計画している燃料取扱機・クレーンの搬入等を可能としている。



可動屋根イメージ図

任意の位置で約50%の開口が可能



A-A断面図

大型カバーの施工（被ばく線量の低減）

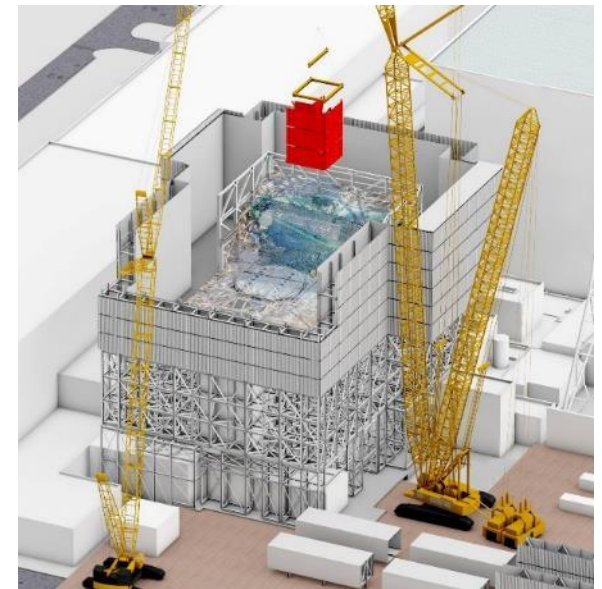
- 1号機原子炉建屋周辺は、線量が高く、有人による作業は作業員の被ばく線量が増加する。
- このため、作業員の被ばく線量を低減する観点から、
 - 低線量となるエリアでの鉄骨のブロック化
 - 高線量エリアではできる限り遠隔操作による施工を実施する。



構外ヤード（低線量エリア）での鉄骨のブロック化



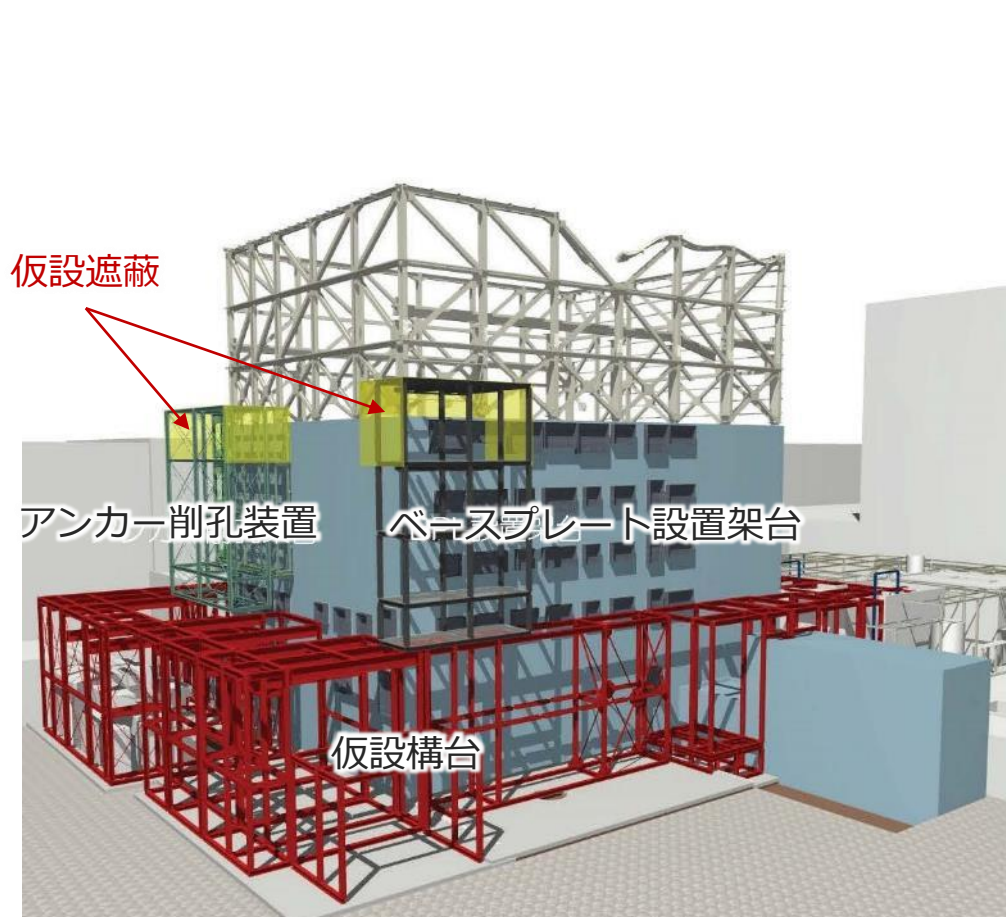
1号機まで鉄骨を搬送



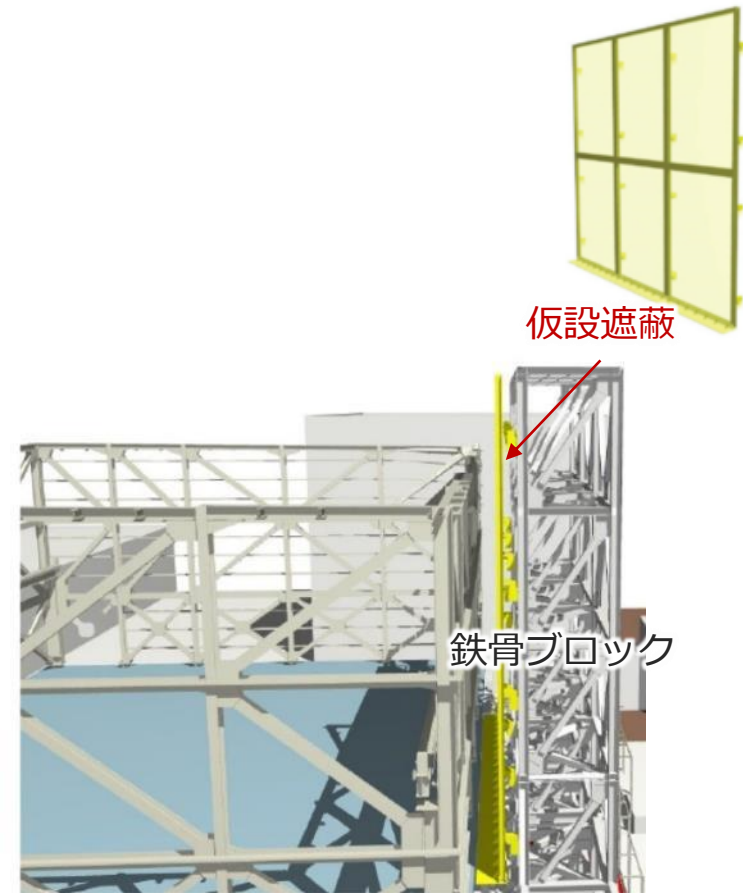
原子炉建屋（高線量エリア）での遠隔操作による鉄骨建方

大型カバーの施工（被ばく線量の低減）

- 一部、高線量エリアでの有人作業が発生することから、被ばく線量を低減するため、鉄骨ブロックのオペフロ側等に仮設遮蔽を設ける。



アンカー削孔装置の遮蔽イメージ



鉄骨建方時の遮蔽イメージ

大型カバー設置工事の線量計画

■ 大型カバー設置工事の総被ばく線量は約6,654人・mSvと計画している。

No.	作業内容	作業詳細	高線量エリアで実施する有人作業	総被ばく線量 (人・mSv)	主な被ばく低減対策
1.	付帯作業	飛散防止剤散布, 情報棟管理, T/B昇降足場設置, 支障物撤去等	T/B昇降用の足場組立, 支障物の切断・運搬等	472	一時退避エリア設定, 足場ブロック化等
2.	地組, 構内運搬	構外ヤード地組, 構内運搬路調査等	-	4	-
3.	地業工事	R/B周辺地盤整備, コンクリート打設等	R/B西・北側の地面のすき取り, コンクリートの打設等	365	鉄筋・型枠ブロック化, 一時退避エリア設定等
4.	R/B外壁調査	調査用足場組立・解体, 外壁塗膜剥離, 外壁調査等	調査用足場組立・解体, 外壁塗膜剥離, ひび割れ調査, コンクリート強度調査	668	仮設足場ブロック化, 一時退避エリア設定等
5.	アンカー削孔	アンカー削孔, BPL取付等	アンカー削孔装置設置・移動・メンテナンス, BPLの位置合わせ等	1,880	アンカー削孔装置の利用, BPL設置架台の利用, 一時退避エリア設定等
6.	大型カバー鉄骨設置	仮設構台設置	鉄骨建方, ボルト接合, 塗装補修等	980	仮設遮蔽設置, 一時退避エリア設定, モックアップ実施等
		下部架構設置		980	
		上部架構設置		700	
		ボックスリング設置		500	
7.	天井クレーン, 屋根設置	天井クレーン設置	部材・機器設置, 試運転調整等	35	一時退避エリア設定, モックアップ実施等
		屋根設置		70	
計				6,654	

外壁調査の線量計画

- 西面の外壁調査の実績をもとに、各箇所の子被ばく線量を計画した。
- 南面はSGTS配管の撤去後に、西面と同程度まで空間線量が低減されると想定して総被ばく線量を計画した。
- 外壁調査の線量計画

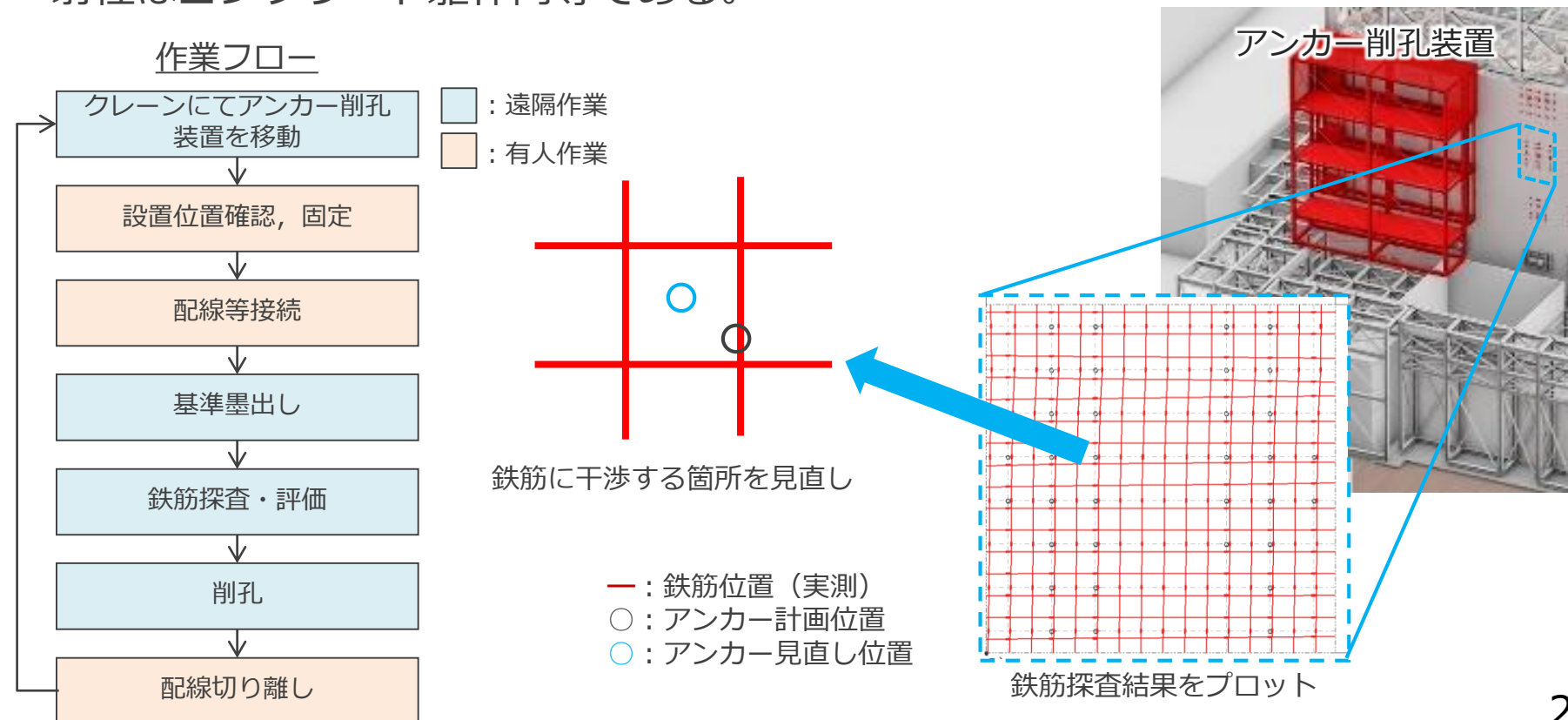
[人・mSv]

No,	作業内容	作業詳細	西面	北面	東面	南面	計
1.	調査用足場組み立て	仮設足場地組, 建て方, 解体	45.6	45.0	46.0	44.5	181.1
2.	塗膜剥離	養生, 剥離剤塗布, 塗膜剥離	140.0	75.4	71.4	85.2	372.0
3.	ひび割れ調査	ひび割れ位置・幅・長さ・深さ計測	34.8	18.6	17.6	21.0	92.0
4.	コンクリート強度調査 (リバウトハンマー)	リバウトハンマー試験	8.7	4.7	4.4	5.3	23.1
計			229.1	143.7	139.4	156.0	668.2

参考	コンクリート強度調査 (コンクリートコア)	アンカー設置, 機器固定, コア削孔	45.2	24.2	22.9	27.3	119.6
----	-----------------------	--------------------	------	------	------	------	-------

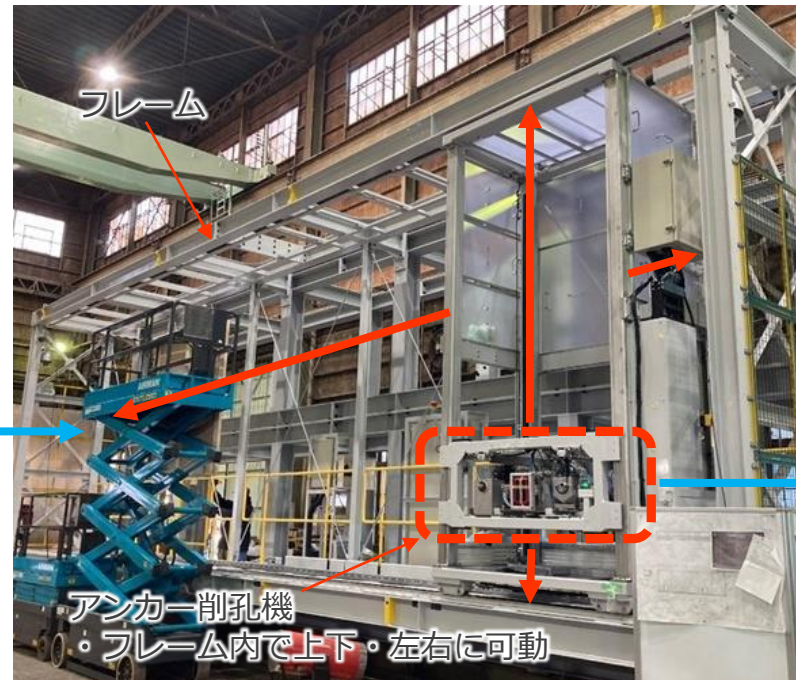
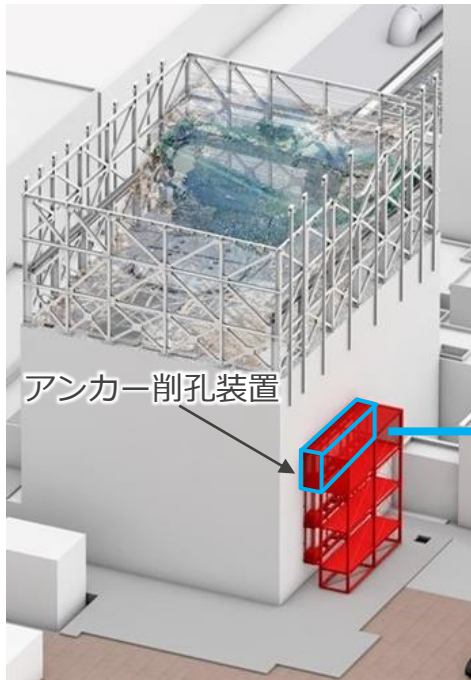
大型カバーの施工（アンカーの設置方法）

- 大型カバーを原子炉建屋に固定するアンカーは作業フローに基づき設置する。
- この内、時間を要する壁の鉄筋探査、壁への削孔作業については、アンカー削孔装置を用いて自動で実施する。なお、配筋が200mm間隔で設置されているのに対し、アンカーは400mm間隔、削孔径40mmで設置することから、探査により鉄筋を確認した上で、できる限りこれらを避けて孔を設ける計画である。
- アンカーの固定材は無機系材料（セメント系）を使用しており、耐久性や対放射性はコンクリート躯体同等である。



大型カバーの施工（アンカーの設置方法）

- アンカー削孔前の鉄筋探査は、アンカー削孔装置に設ける鉄筋探査装置により遠隔で行う。
- アンカー削孔装置は、鉄筋探査や削孔を遠隔で行うために、鉄筋探査装置や削孔用ドリルを有するアンカー削孔機をフレームに組み込み、このフレーム内を上下左右に可動することで範囲内の鉄筋探査、削孔を可能としている。

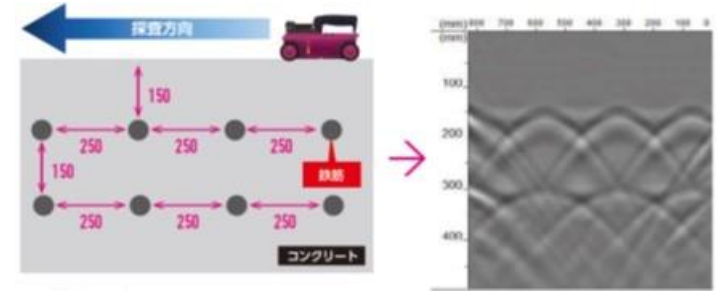


大型カバーの施工（アンカーの設置方法）

- 鉄筋探査装置は、一般現場でも使用実績のあるレーダー方式の装置を用いる。



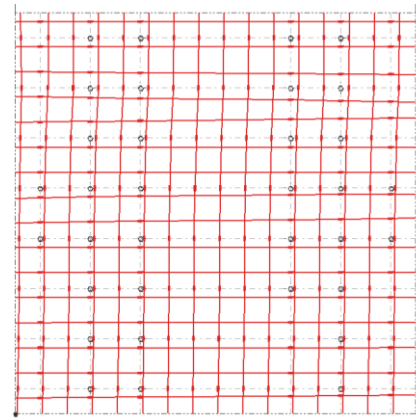
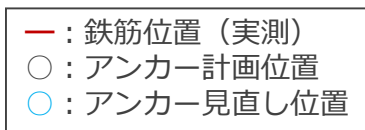
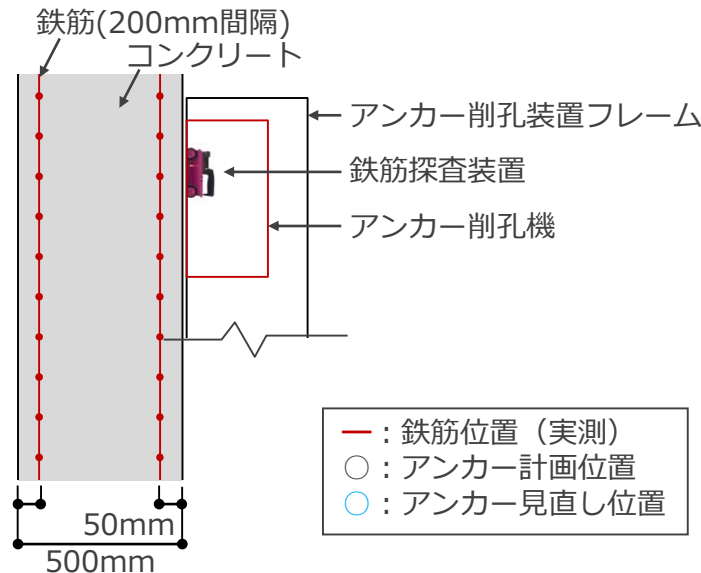
主な性能	
項目	性能
方式	電磁波レーダ方式
探査対象物	鉄筋・埋設管(鉄管, 塩ビ管, CD管 等)・空洞・ジャンカ等
測定深度	5~450mm



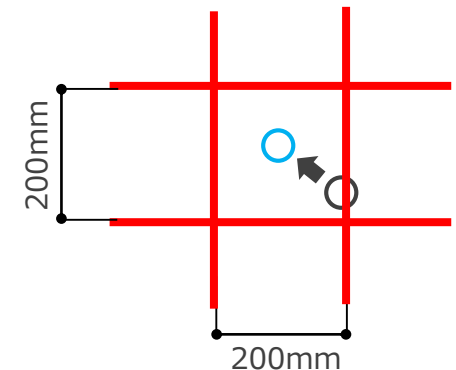
測定画像例

鉄筋探査装置：NJJ-200K

- アンカー削孔装置に設置した鉄筋探査装置により測定した探査結果を図面にプロットし鉄筋と干渉するアンカー位置を見直す。



鉄筋探査結果をアンカー配置計画位置に対してプロット



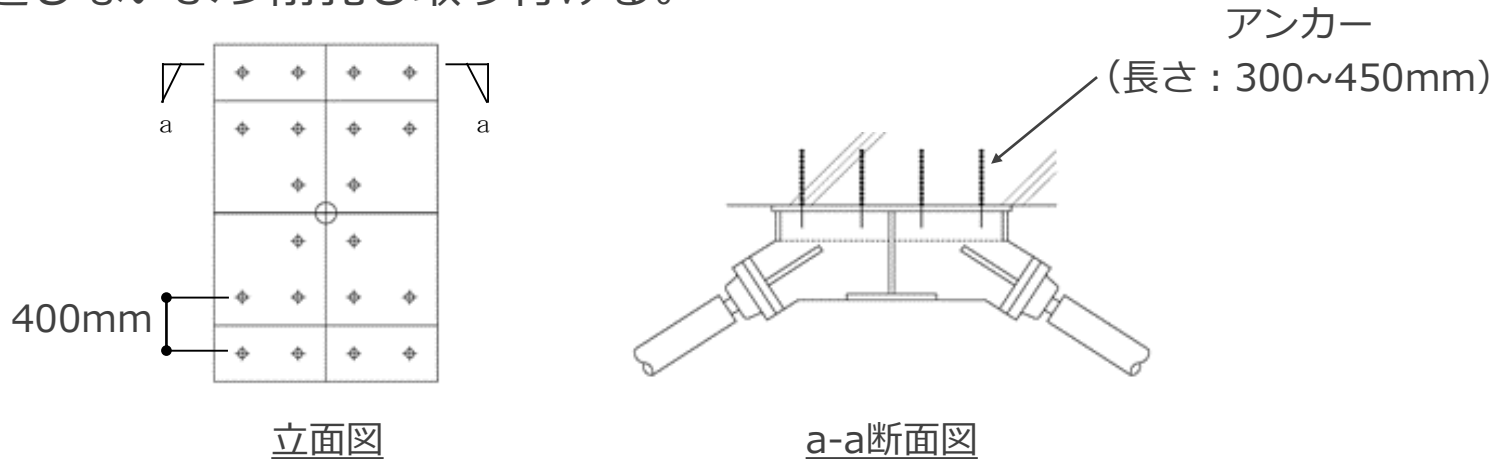
鉄筋に干渉するアンカー位置を見直し

R/B外壁のイメージ(代表部)

大型カバーの施工（アンカー削孔に伴うR/Bへの影響）

■ アンカー取り付け部の構造

アンカー取り付け部の概要を下図に示す。アンカーはタテヨコ共に400mm間隔を基本とし配置され、アンカー径33mmに対して最大Φ40mmで外壁外面から外壁を貫通しないよう削孔し取り付ける。



■ アンカー削孔による欠損影響程度

● 外壁部の剛性低下影響

外壁を削孔することによる剛性低下の影響は、外壁見付け面積当たりの削孔面積で換算できる。Φ40mmが仮に400mm×400mm間隔で外壁全面に開けられた場合の欠損率は1%弱であり、影響は極めて小さい。

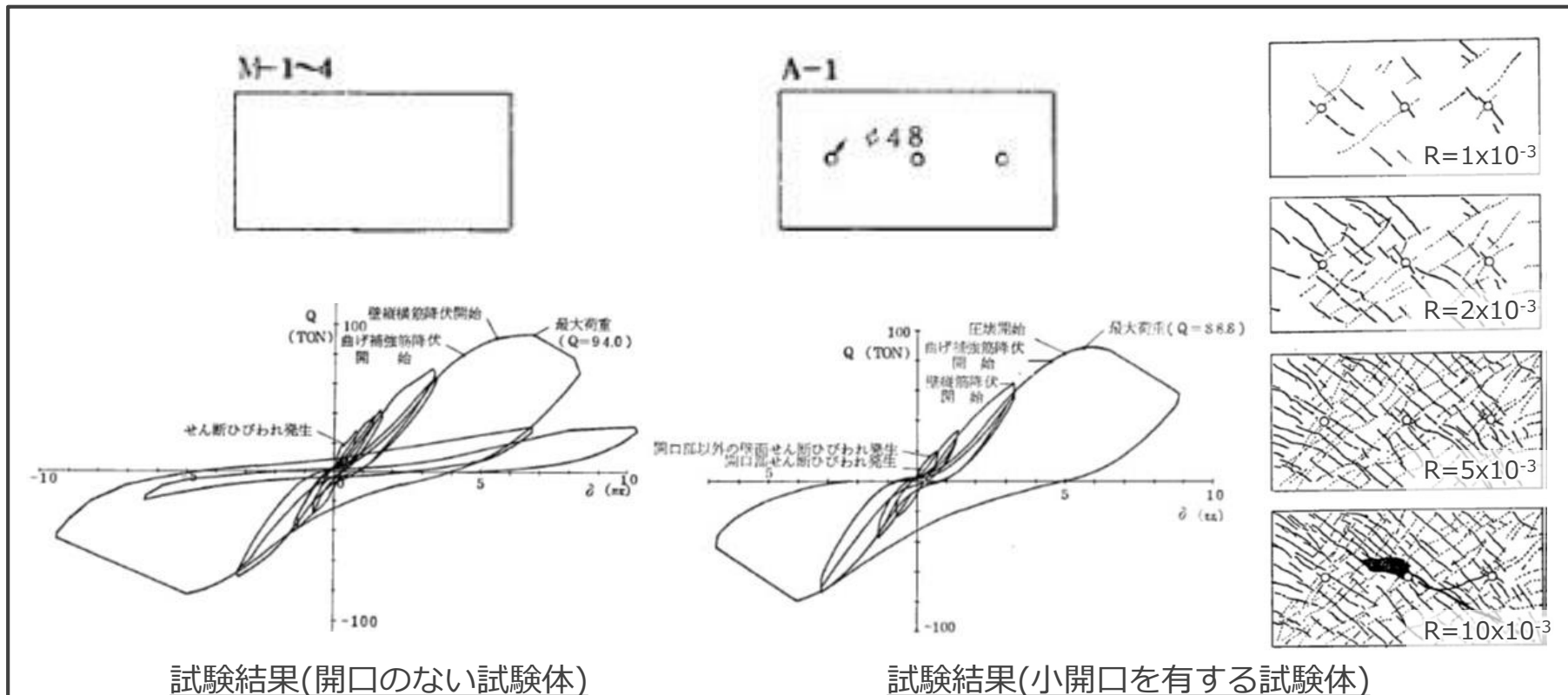
$$20 \times 20 \times \pi \times (1000/400) \times (1000/400) / (1000 \times 1000) = 0.79\%$$

● 削孔後、速やかにアンカー+モルタルで補修するため削孔中の影響は一時的であり耐震性の低下に至ることはない。

大型カバーの施工（アンカー削孔に伴うR/Bへの影響）

文献調査

- 吉崎ほか「多数の小開口をもつ原子炉建屋耐震壁の終局せん断強度」※1
開口のない試験体と1号機外壁と類似欠損率となる小開口を有する試験体による水平加力試験結果を以下に示す。
文献によると、「ひび割れ発達に開口影響は少ないように思われる」と報告されている。また、両試験体の水平荷重-変位関係の比較では、両者の結果に顕著な差は見られない。



出典：※1 吉崎他：多数の小開口をもつ原子炉建屋耐震壁の終局せん断強度 1984JCI論文

大型カバーの施工（アンカー削孔に伴うR/Bへの影響）

■ 文献の適用性について

開口のない試験体と小開口を有する試験体は荷重変形曲線やせん断強度に顕著な差は見られず、同等の欠損率であれば、耐力低下の影響は無いと言える。また、本文献は原子炉建屋建設時に設ける機器配管の開口を想定しているものの、開口補強筋は考慮していないことから、アンカー設置と同等の条件であると言える。一方、アンカー設置時の開口間隔に対する知見が得られなかったことから、アンカー削孔を考慮したFEM（有限要素法）による解析評価を行う。

	大型カバーに用いるアンカー	吉崎ほか「多数の小開口をもつ原子炉建屋耐震壁の終局せん断強度」※1
開口(削孔)径	Φ40mm	Φ48mm
欠損率	0.66%	0.83%
水平断面の開口数	2~4	3
開口の段数	6	1
開口の間隔	400mm	400mm
削孔深さ	300,375,350mm	貫通
壁厚	400~1100mm	100mm
コンクリート強度	22.1N/mm ²	335kg/cm ²
壁鉄有無	有	有
加力方法	面内鉛直・水平力	面内水平加力
図	<p>A schematic diagram of a large cover cross-section. It shows a rectangular area with a height of 2,400mm and a width of 1,600mm. The area is divided into a 4x6 grid of anchor holes, represented by small diamonds. A central circle indicates a specific feature or hole.</p>	<p>A schematic diagram of a specimen labeled 'A-1'. It shows a rectangular area with a height of 650mm and a width of 1,300mm. A single large hole with a diameter of Φ48 is shown in the center. There are also some smaller circles and lines indicating internal features or reinforcement.</p>

大型カバーの施工（アンカー削孔に伴うR/Bへの影響）

■ アンカー削孔を考慮したFEMによる評価

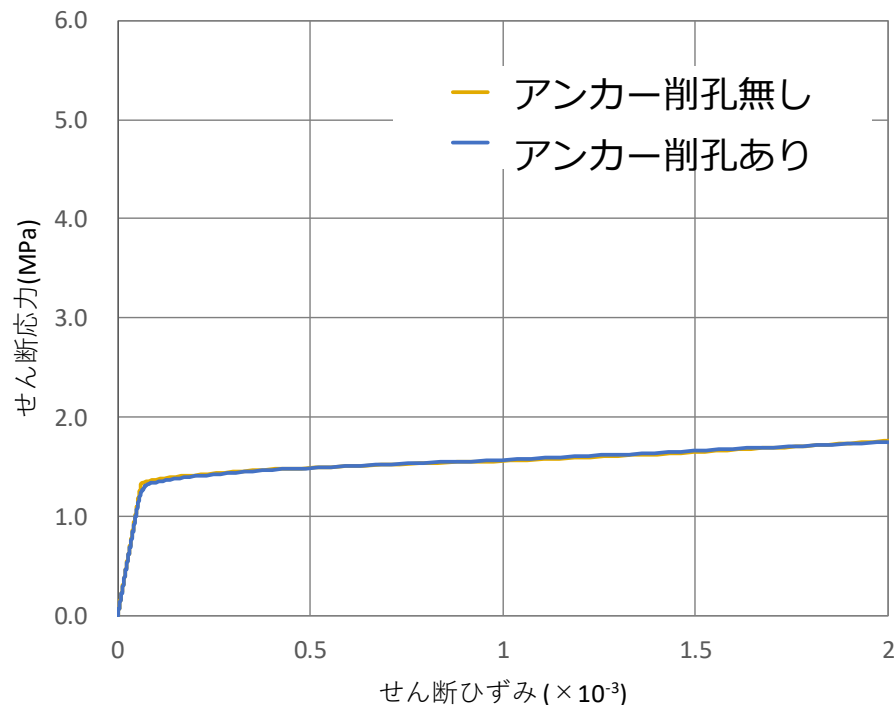
- 文献調査では、アンカーの間隔に対する影響が確認できないため、アンカー削孔がない場合と欠損とみなした場合をFEMにより比較する。

	大型カバーに用いるアンカー	今回モデル
開口(削孔)径	Φ40mm	Φ40mm
欠損率	0.66%	0.79%
水平断面の開口数	2~4	11
開口の段数	6	11
開口の間隔	400mm	400mm
削孔深さ	300,375,350mm	貫通
壁厚	400~1100mm	1,100mm
コンクリート強度	22.1N/mm ²	22.1N/mm ²
壁鉄有無	有	有
境界条件	—	正方形の鉄筋コンクリート造平板が純せん断変形をするよう4隅をローラー支持
荷重条件	—	4辺上の接点に集中荷重を与え面内せん断力を入力
図	<p>2,400mm</p> <p>1,600mm</p>	<p>5,600mm(外壁内法寸法)</p> <p>5,600mm</p>

大型カバーの施工（アンカー削孔に伴うR/Bへの影響）

■ アンカー削孔を考慮したFEMによる評価

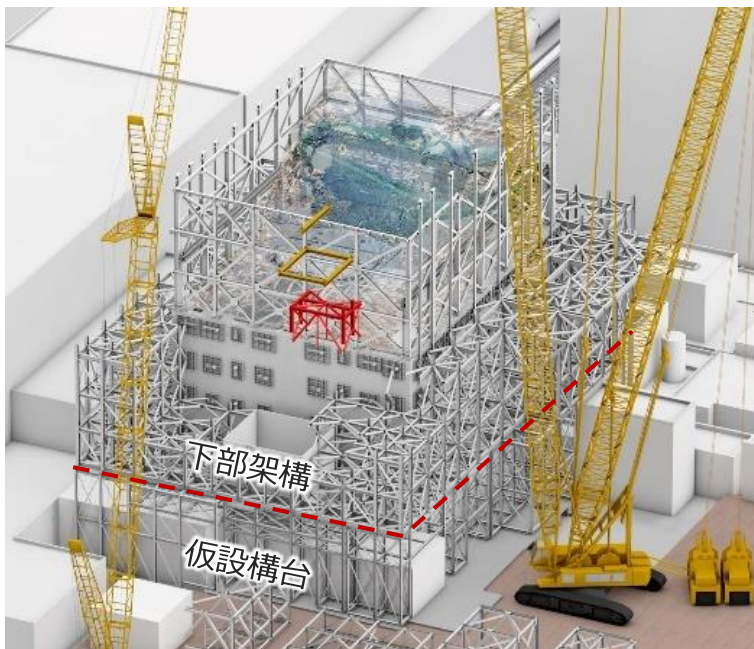
- アンカー削孔がない場合とある場合の荷重変形（せん断応力-せん断ひずみ）の比較を以下に示す。両者の結果に顕著な差異はみられず、欠損による耐震安全上の影響はないことを確認した。
- 評価の詳細を添付資料4に示す。



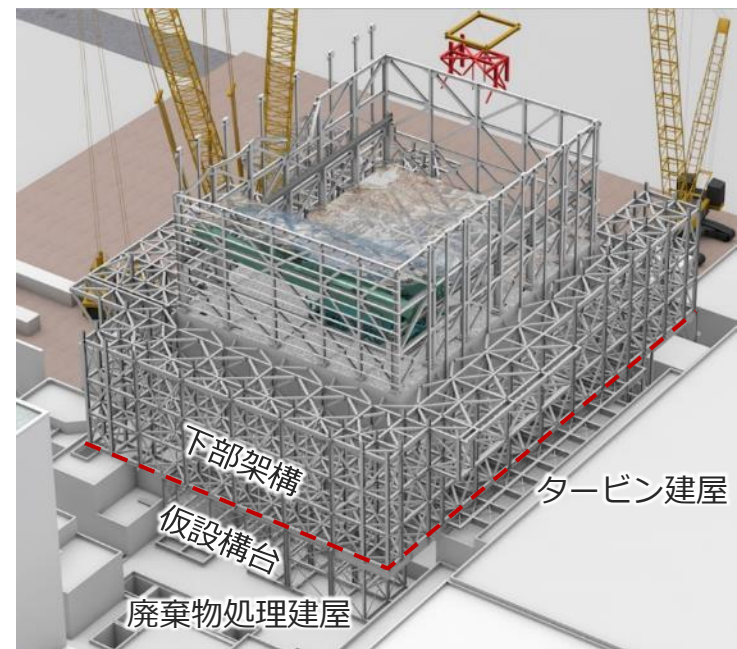
せん断応力-せん断ひずみの比較

大型カバーの施工（仮設構台の役割）

- 大型カバーの組み立てに当たり、下部架構を設置する際には、仮設構台を利用する。
- 仮設構台は、地盤面から建てられており、原子炉建屋の四面に設置される。
- 下部架構がアンカーにより原子炉建屋に支持された後は、仮設構台側に下部架構等の大型カバーの荷重はかからないようになる。なお、大型カバー設置後も残置する。



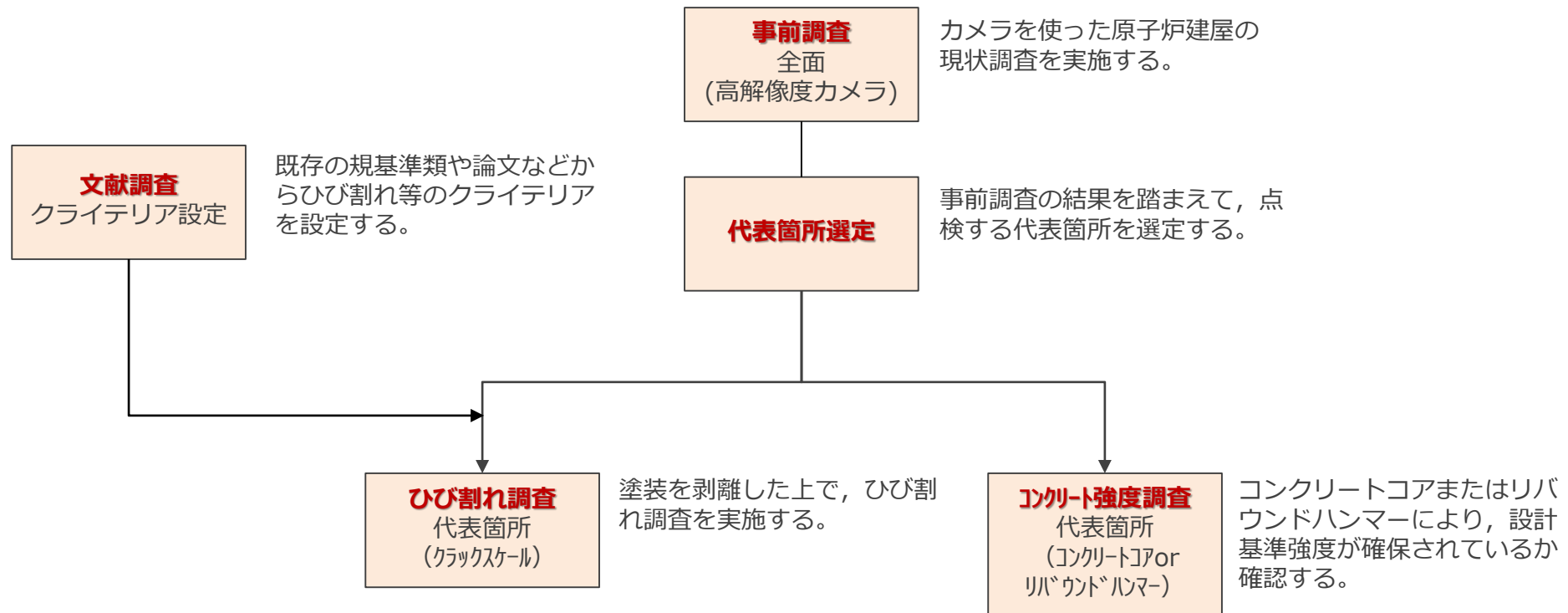
北西側からのイメージ



南東側からのイメージ

原子炉建屋の外壁調査計画（全体方針）

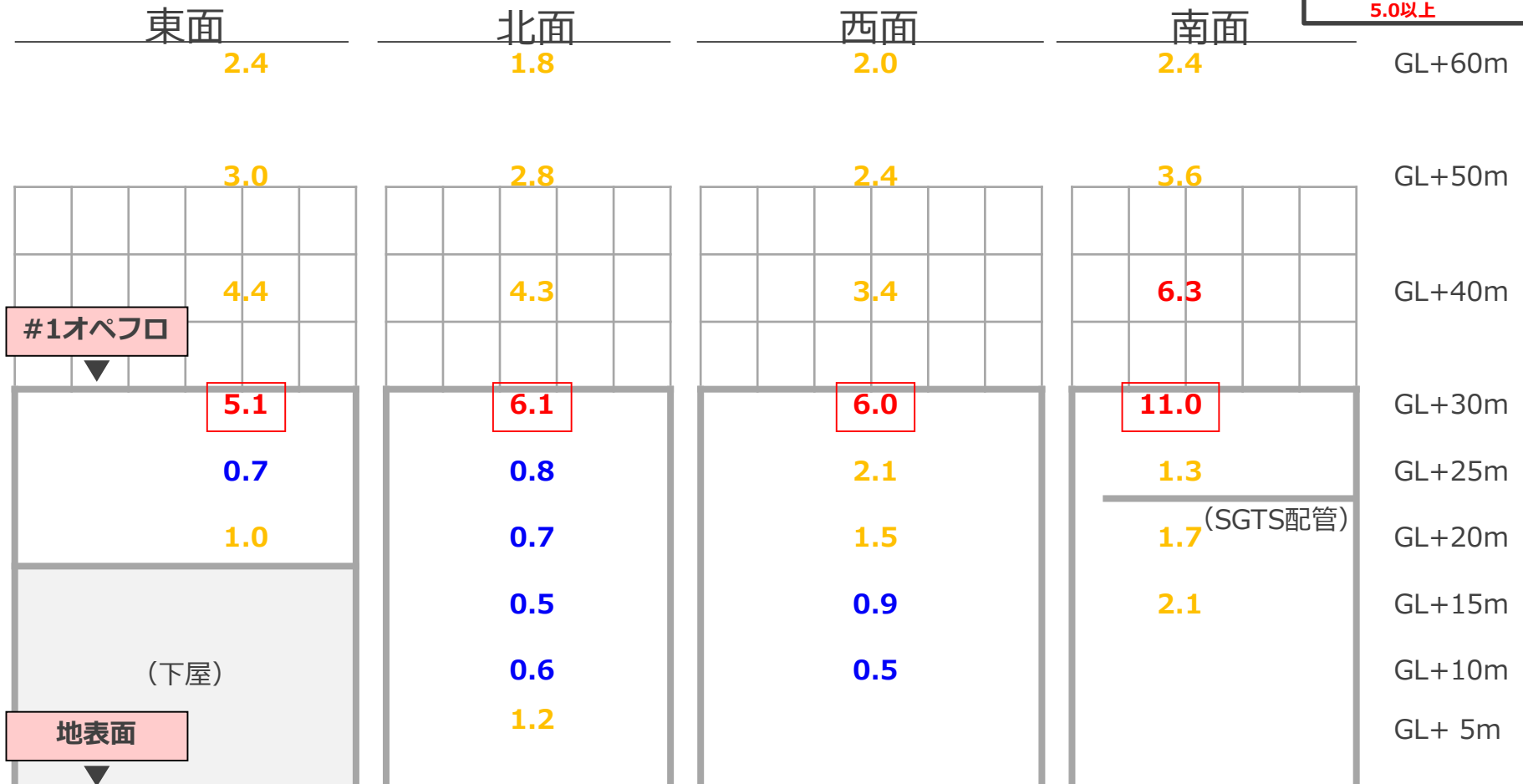
- 大型カバー設置に当たっては、原子炉建屋外壁にアンカーにより支持させることから、原子炉建屋の外壁の状態を確認することが重要である。
- このため、アンカーを設置する上で確認が必要なひび割れ調査及びコンクリート強度調査を実施する。



原子炉建屋の外壁調査計画（線量環境）

- 外壁調査は、高所かつ高線量箇所であるため、事前調査は遠隔からカメラ撮影により行い、ひび割れ調査及びコンクリート強度調査はアンカー削孔装置を使用し削孔のタイミングに合わせてながら実施する計画である。

凡例：1.0未満
1.0以上～5.0未満
5.0以上



原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査）

- 原子炉建屋に地震，水素爆発，その他経年劣化によって，大きなひび割れ等の損傷が生じていないことを確認するため，目視による調査を実施する。
- 目視による調査に当たっては，高線量及び高所であることを考慮して，高解像度カメラによる調査を実施し，ひび割れ調査及びコンクリート強度調査の代表箇所を選定する。

PHASEONE XF Camera Systems



使用する高解像度カメラ

- メーカー：PHASEONE
- 型番：XF IQW3 100PM
- 解像度：1億100万画素
- 有効画素数：11608×8708



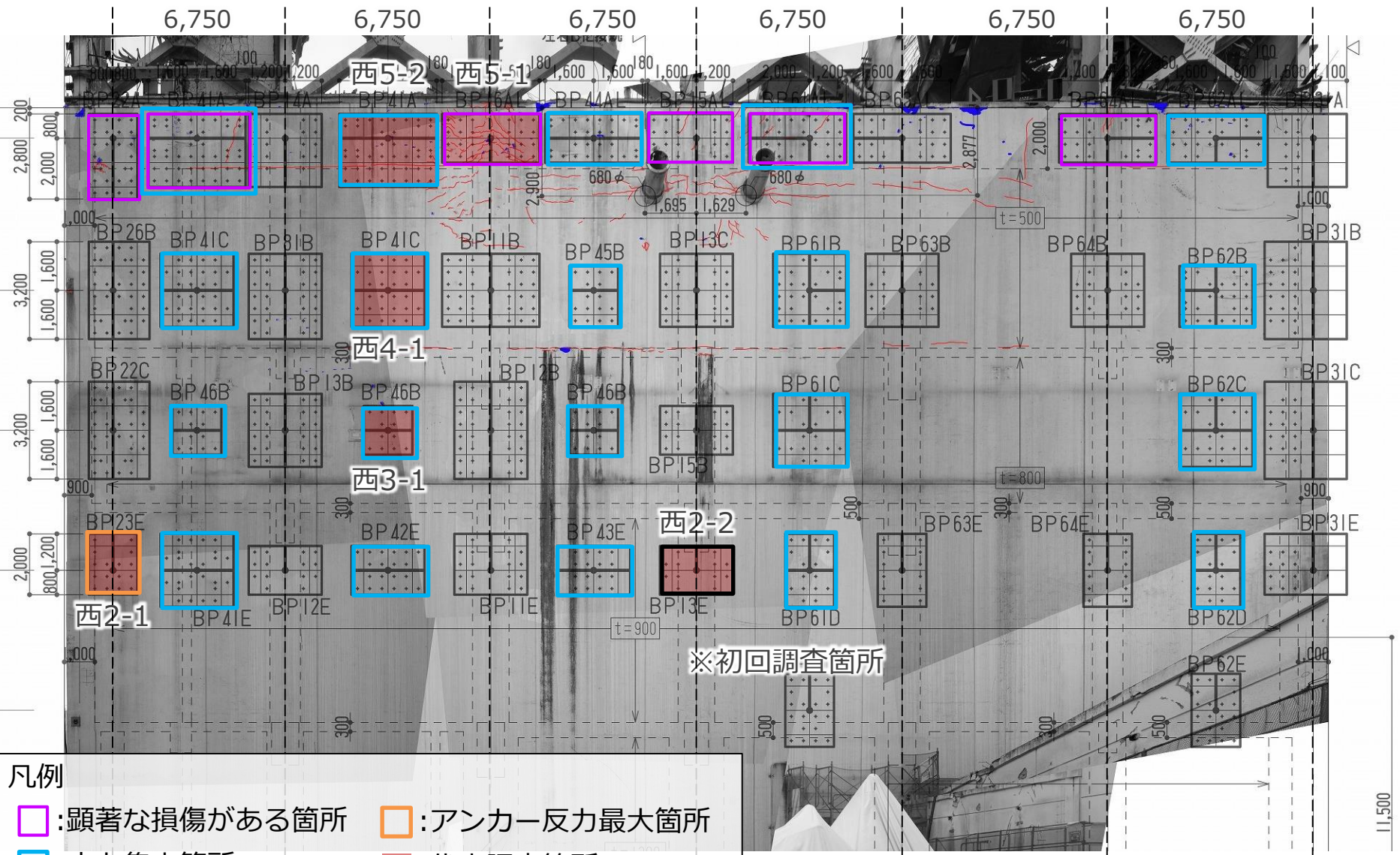
撮影した写真画像の一例（西面）

原子炉建屋の外壁調査計画（代表箇所を選定方法）

- R/B外壁部は高線量であることから、ひび割れ調査及びコンクリート強度調査は代表的な箇所を選定し実施する。
- 選定にあたっては、事前調査で塗膜面に損傷が認められる箇所、応力集中箇所、アンカー反力最大箇所の中から各面各段1~2箇所を選定する。
 - 塗膜面に損傷がある箇所
各面各段のアンカー設置箇所の塗膜面に割れや剥離が比較的多い箇所を代表箇所とする。
 - 応力集中箇所
地震及び水素爆発の影響を受ける場合、柱梁に囲まれた有効スパンが広く、壁厚の薄い箇所が最も不利となることから、各面各段のアンカー設置箇所のうち、壁厚-有効スパンの比率が最も小さい箇所とする。
 - アンカー反力最大箇所
基準地震動Ss600による地震応答解析の結果から得られる、各面の大型カバーアンカー反力の最大箇所とする。なお、アンカーには引張力とせん断力が生じるが、本設計ではせん断力が支配的となる。

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

西面



- 凡例
- : 顕著な損傷がある箇所
 - : アンカー反力最大箇所
 - : 応力集中箇所
 - : 代表調査箇所

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

■ 代表箇所を選定プロセス

● 西面

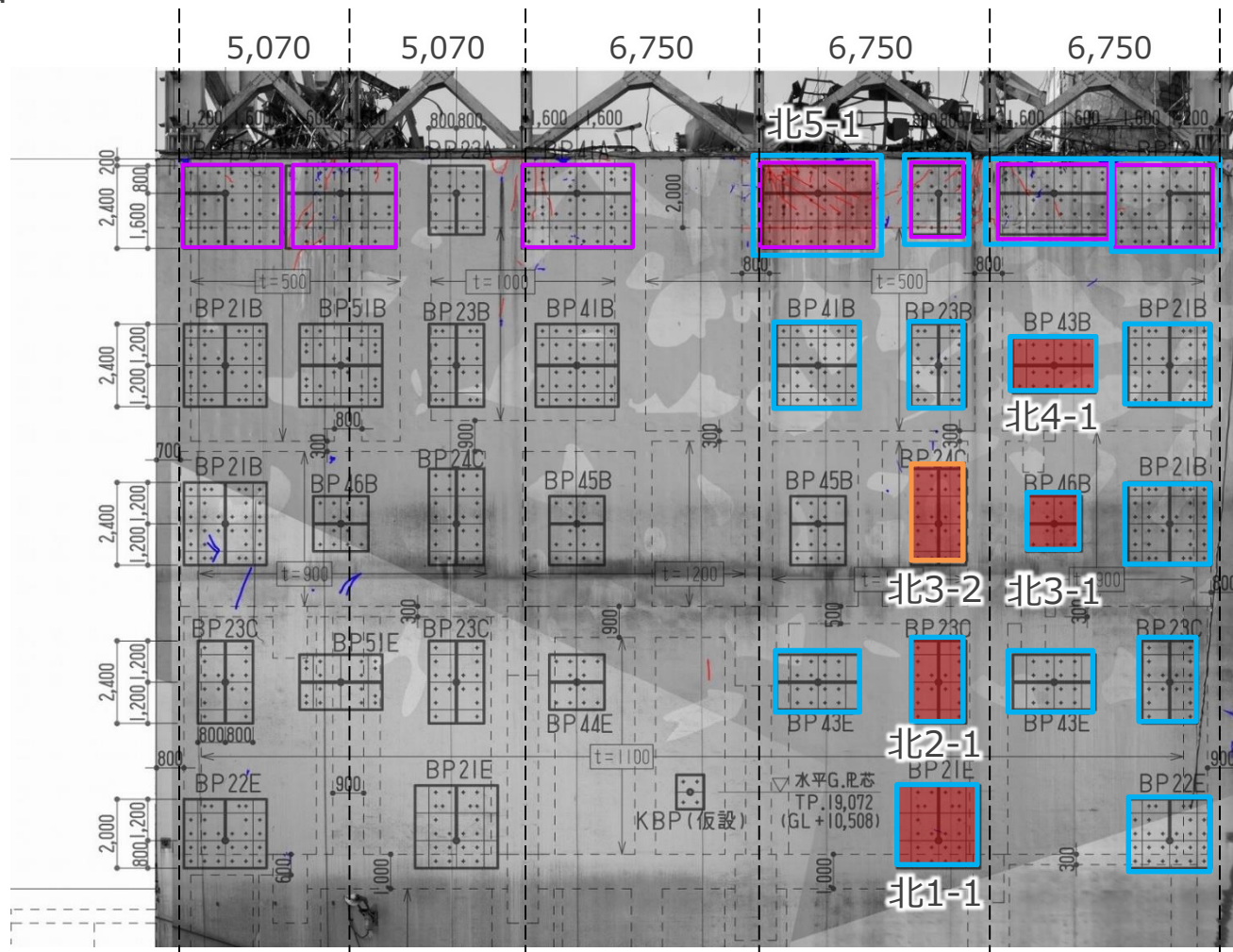
段数	No.	選定理由
5	西5-1	塗膜面に損傷がある箇所の内、塗膜面の損傷が著しい箇所を選定
	西5-2	応力集中箇所の内、塗膜面の損傷が著しい西5-1近傍が、より応力を受けたと想定し選定
4	西4-1	応力集中箇所の内、調査の作業性を考慮し5段目調査箇所を近傍の列に選定
3	西3-1	西4-1と同理由
2	西2-1	当該面のアンカー反力検定比が最大の箇所を選定 $Q/Q_a=0.89(P/P_a=0.17)$
	西2-2	調査の作業性を考慮し初回アンカー設置箇所を選定

【凡例】

Q : アンカーのせん断力
 Q_a : アンカーのせん断耐力
 P : アンカーの引張力
 P_a : アンカーの引張耐力

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

■ 北面



- 凡例
- : 顕著な損傷がある箇所
 - : アンカー反力最大箇所
 - : 応力集中箇所
 - : 代表調査箇所

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

■ 代表箇所を選定プロセス

● 北面

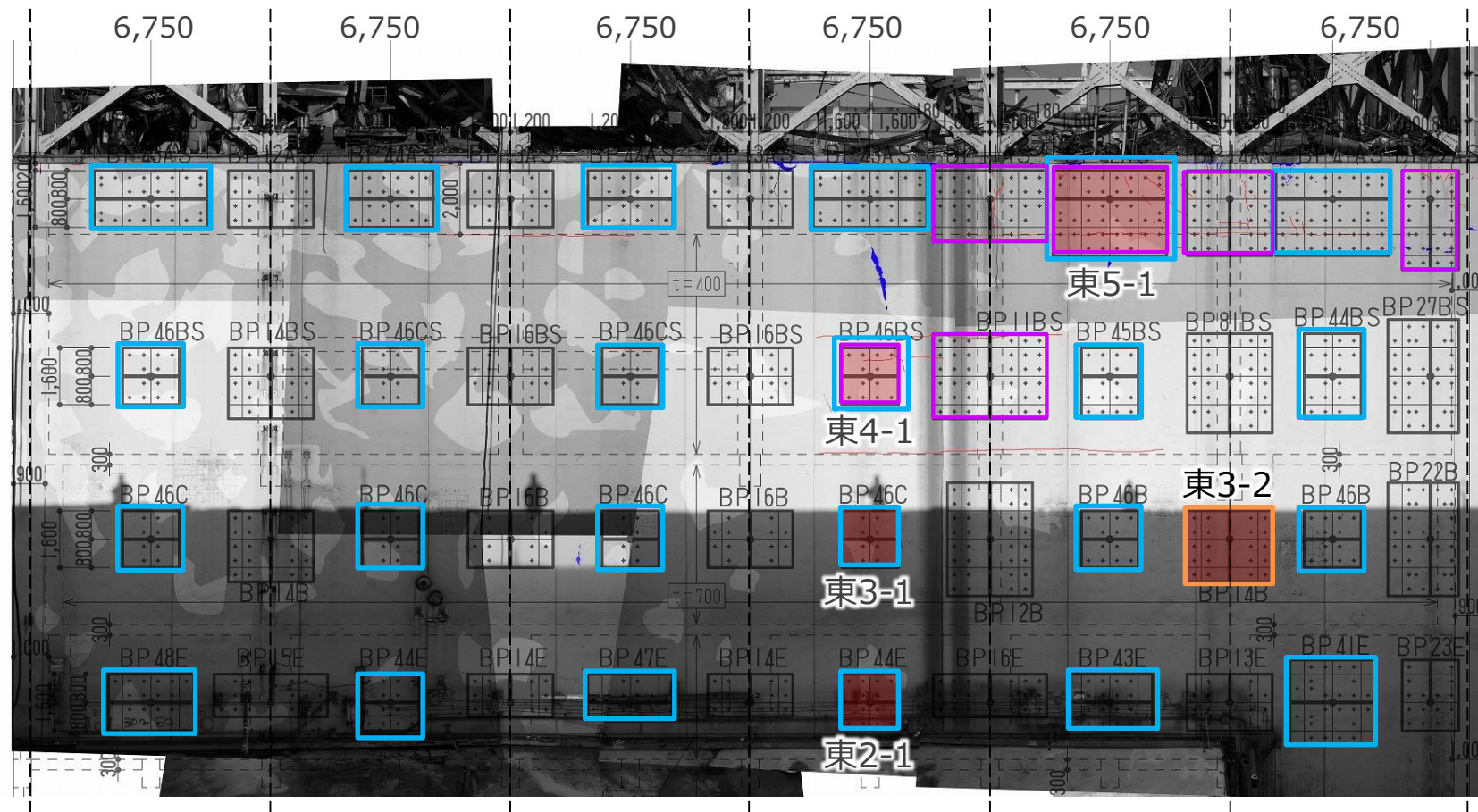
段数	No.	選定理由
5	北5-1	塗膜面に損傷がある箇所と応力集中箇所が重複する箇所のうち、比較的塗膜面の損傷が大きい箇所を選定
4	北4-1	応力集中箇所の内、調査の作業性を考慮し1~4段を近傍に選定
3	北3-1	北4-1と同理由
	北3-2	当該面のアンカー反力検定比が最大の箇所を選定 $Q/Q_a=0.89(P/P_a=0.22)$
2	北2-1	北4-1と同理由
1	北1-1	北4-1と同理由

【凡例】

Q : アンカーのせん断力
 Q_a : アンカーのせん断耐力
 P : アンカーの引張力
 P_a : アンカーの引張耐力

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

東面



凡例

- : 顕著な損傷がある箇所
- : アンカー反力最大箇所
- : 応力集中箇所
- : 代表調査箇所

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

■ 代表箇所を選定プロセス

● 東面

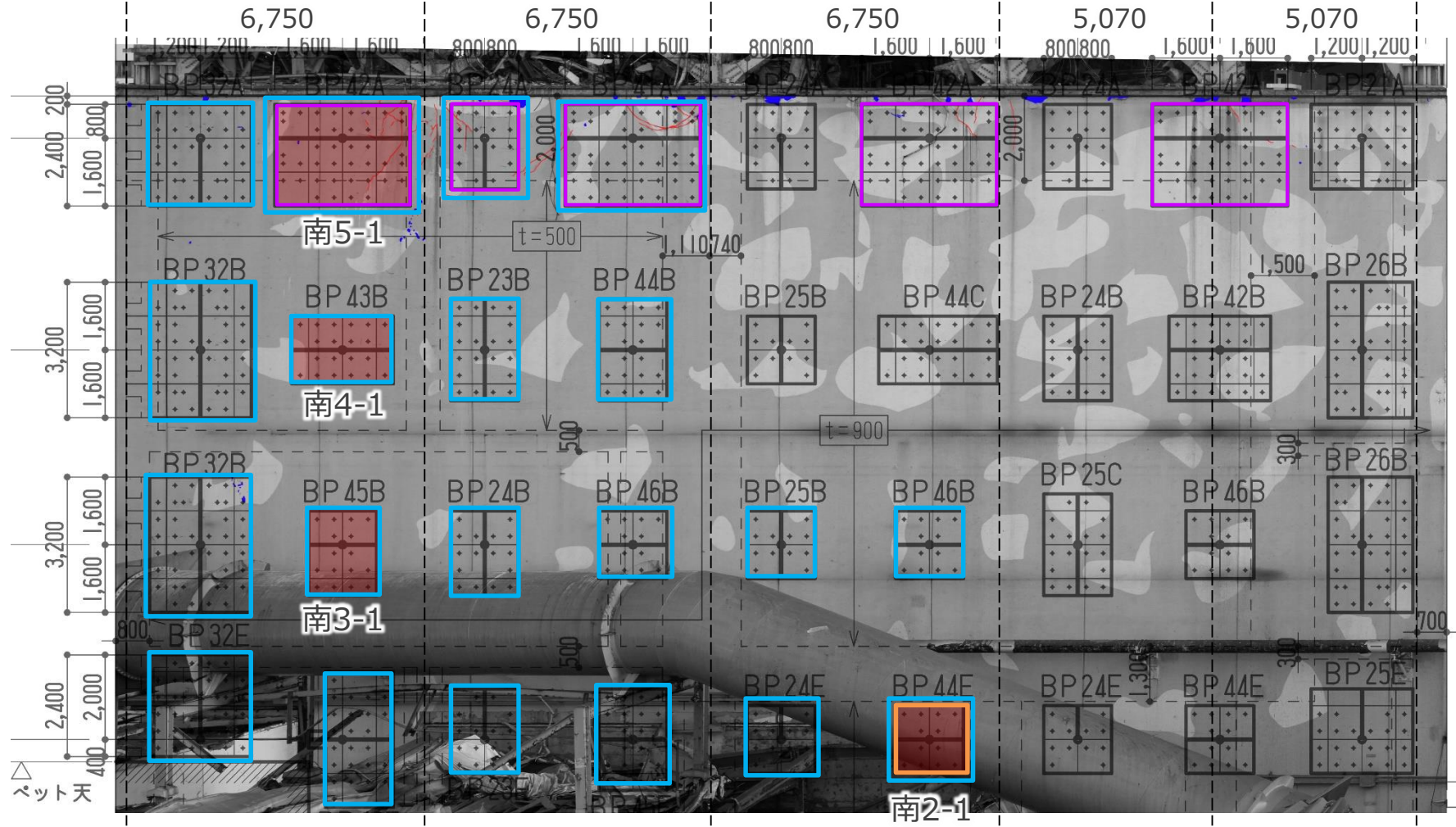
段数	No.	選定理由
5	東5-1	塗膜面に損傷がある箇所と応力集中箇所が重複する箇所を選定
4	東4-1	塗膜面に損傷がある箇所と応力集中箇所が重複する箇所を選定
3	東3-1	応力集中箇所の内、調査の作業性を考慮し東4-1近傍の列に選定
	東3-2	当該面のアンカー反力検定比が最大の箇所を選定 $Q/Q_a=0.89(P/P_a=0.13)$
2	東2-1	東3-1と同理由

【凡例】

Q : アンカーのせん断力
 Q_a : アンカーのせん断耐力
 P : アンカーの引張力
 P_a : アンカーの引張耐力

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

■ 南面



- 凡例
- : 顕著な損傷がある箇所
 - : アンカー反力最大箇所
 - : 応力集中箇所
 - : 代表調査箇所

原子炉建屋の外壁調査計画（事前調査結果）

■ 代表箇所を選定プロセス

● 南面

段数	No.	選定理由
5	南5-1	塗膜面に損傷がある箇所と応力集中箇所が重複する箇所を選定
4	南4-1	応力集中箇所の内、調査の作業性を考慮し南5-1近傍の列に選定
3	南3-1	南4-1と同理由
2	南2-1	当該面のアンカー反力検定比が最大の箇所と応力集中箇所が重複する箇所を選定 $Q/Qa=0.90(P/Pa=0.00)$

【凡例】

Q : アンカーのせん断力
 Qa : アンカーのせん断耐力
 P : アンカーの引張力
 Pa : アンカーの引張耐力

原子炉建屋の外壁調査計画（文献調査）

■ 文献の適用性について

ひび割れ調査のクライテリア設定にあたり各種文献調査を行い，1mm以下のひび割れであれば，貫通の有無，位置が設計耐力に与える影響は軽微であることを確認した。

大型カバーに用いるアンカーと文献調査におけるアンカーの比較

	大型カバーに用いる セメフォースアンカー	電共研 AIJ梗概 2018 ^{※1}	岐阜大 川口 JCI 2015 ^{※2}
アンカータイプ	接着系アンカー	頭付きスタッドボルト	接着系アンカー (カプセル式)
アンカーボルト径D	M33	試験部はφ19	M16
アンカー鋼材種類	SNR490B 全ねじ	SCM435 クロムモリブデン鋼	ABR400
アンカー強度 (N/mm ²)	降伏点400以上保証	降伏点785以上	引張強度400
コンクリート強度 (N/mm ²)	22.1	34.1~35.6 (目標値35)	22.2 (目標値24)
埋込長さ	300mm (9D) 375mm (11D) 450mm (13D)	90mm (4.7D)	130mm (8D)
ひび割れ幅 (mm)	—	0.35, 1.0	0.2, 0.5, 1.0
ひび割れ本数	—	1本	1本
ひび割れ位置	—	アンカー位置から0	アンカー位置から 0, 4D, 8D
設計耐力 (コーン破壊) (kN)	300mm (9D) : 250 375mm (11D) : 253 450mm (13D) : 264	63~65	24.4

東京電力見解 (論文適用の妥当性)	—	<p>①試験体のコンクリート強度は、本設計の実強度と同程度である。</p> <p>②試験体厚さ方向に貫通するひび割れで保守的な設定となっている。</p> <p>③アンカー設置後のひび割れであり、ヘッドに沿って剥離してすべりが生じるなど、本設計のあと施工仕様より厳しい破壊状況となっている。</p> <p>④ひび割れ幅0.35mm, 1.0mmの引抜試験を実施しているが、1.0mmであっても設計耐力（コーン破壊）を上回っている。</p> <p>⑤埋込長さが4.7Dと本設計の仕様より短いが、安定した耐力を保持している。</p> <p>⑥無筋ゾーンへの定着であり、実機のように壁筋の効果を見逃した保守的な設定である。</p>	<p>①セメフォースアンカーと同じ、接着系アンカーを対象としている。</p> <p>②試験体のコンクリート強度は、本設計と同程度である。</p> <p>③試験体厚さ方向に貫通するひび割れで保守的な設定となっている。</p> <p>④ひび割れ幅0.2, 0.5, 1.0mmの引抜試験を実施しているが設計耐力（コーン破壊）を上回っている。</p> <p>⑤ひび割れから4D・8D程度離れていても、ひび割れなしと同等の耐力を保持している。</p> <p>⑥無筋ゾーンへの定着であり、実機のように壁筋の効果を見逃しており保守的な設定である。</p>
----------------------	---	---	---

※1 水谷他 ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（その1~3）2018AIJ梗概

※2 川口他 コンクリート強度及びひび割れがあと施工アンカーの耐荷性に与える影響 2015JCI論文

原子炉建屋の外壁調査計画（アンカー引抜き・せん断実験）

■ 目的

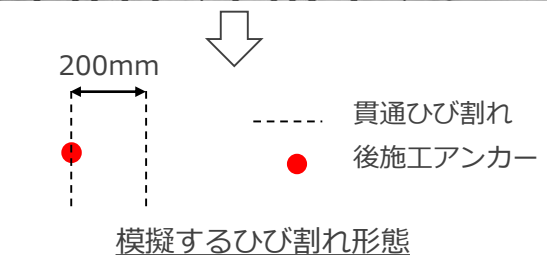
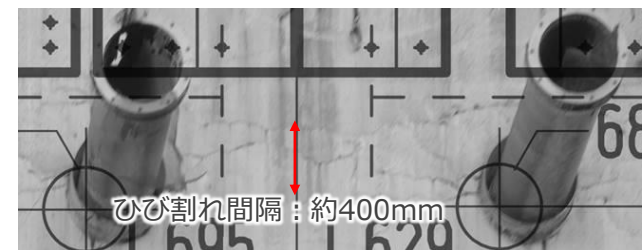
- 既往文献では考慮されていない1mm超えのひび割れ形態を模擬した場合のアンカー許容耐力を確認する。2mm超えのひび割れは補修等を行うことから、ひび割れ幅1~2mm及びひび割れ無しを想定した実験とする。

■ 実験計画

- 静的加力試験における相似則を考慮し、おおむね実機の1/2縮尺となるよう試験体を設定する。
- ひび割れの形態は、事前調査よりひび割れ間隔は400mm程度であることから、アンカーを貫通する貫通ひび割れに加え、アンカーから200mm離れた箇所に貫通ひび割れを設ける。ひび割れ幅は、1mm以上のひび割れを対象とする。なお、今後のひび割れ調査に応じて別途追加実験を検討する。

実機と試験体の諸元

		実機	試験体
RC壁	コンクリート強度	Fc=225 kg/cm2 実強度 35N/mm2	Fc=21 N/mm2 実強度 30N/mm2程度
	鉄筋	上下とも- 1.5段25@200(SD35)	上下とも- 1段D16@100(SD345)
アンカーボルト	径	M33	M16
	材質	SNR490B, Sy≥400	SNR490B, Sy≥400
	埋込深さ	300,375,450mm	160mm
ひび割れ幅		0mm~ 2mm程度	0mm, 1mm (参考2mm)
ひび割れ発生メカニズム		曲げひび割れ	貫通ひび割れ (保守的)



※詳細は次ページ以降

原子炉建屋の外壁調査計画（アンカー引抜き・せん断実験）

- 大型カバー設置工事で適用予定のあと施工アンカー※1を対象に、近傍にひび割れが存在した場合のアンカー設計強度（せん断・引抜）に及ぼすひび割れ影響を把握するため、実機の1/2 縮小試験体を用いた静的加力試験を行う。

※1：住友大阪セメント社製 超速硬セメント系注入式あと施工アンカー「セメフォースアンカー」

実機と試験体の諸元比較

		実機	試験体（1/2縮小）	相似則の考え方
RC壁	コンクリート強度	Fc=225 kg/cm ² 実強度 30N/mm ² 以上	Fc=21 N/mm ² 実強度 30N/mm ² 以下	アンカー強度計算に直接関連するため実機強度と同等以下のコンクリートを採用
	鉄筋	上下とも- 1.5段D25@200(SD35)	上下とも- 1段D16@100(SD345)	アンカー強度計算に直接関連しないが実機と同等程度の鉄筋比となるよう設定（ $\rho_t \approx 0.7\%$ ）
アンカーボルト	径	M33	M16	実機の概ね1/2の標準ボルト径を設定
	材質	SNR490B, Sy \geq 400	SNR490B, Sy \geq 400 （引抜試験はSCM435Hを使用）	せん断：実機ボルトを削り出し製作 引抜：破壊モードをコーン破壊とするため高強度材料を採用
	埋込深さ	375mm	160mm	ボルト径が実機の1/2よりも若干細いため確実にコーン破壊するよう若干浅めに埋込み深さを設定
ひび割れ幅		0mm ~ 2mm程度	0mm, 1mm, 2mm※2 実機換算：0mm,2mm,4mm	実機換算（0mm, 2mm, 4mm※2）となるよう1/2倍の幅で設定
ひび割れ発生メカニズム		曲げひび割れ	貫通ひび割れ	既往実験知見※3を参考に打設前にテフロンシートを挟み込み貫通ひび割れを模擬

※2：実機のひび割れ幅は最大で2mm程度であるが、参考として実機換算4mmについても実施した

※3：川上他：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの引抜耐力に及ぼすひび割れの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，2014，pp1894-1899

試験日のコンクリート圧縮強度

せん断試験	28.3 N/mm ²
引抜試験	28.7 N/mm ²

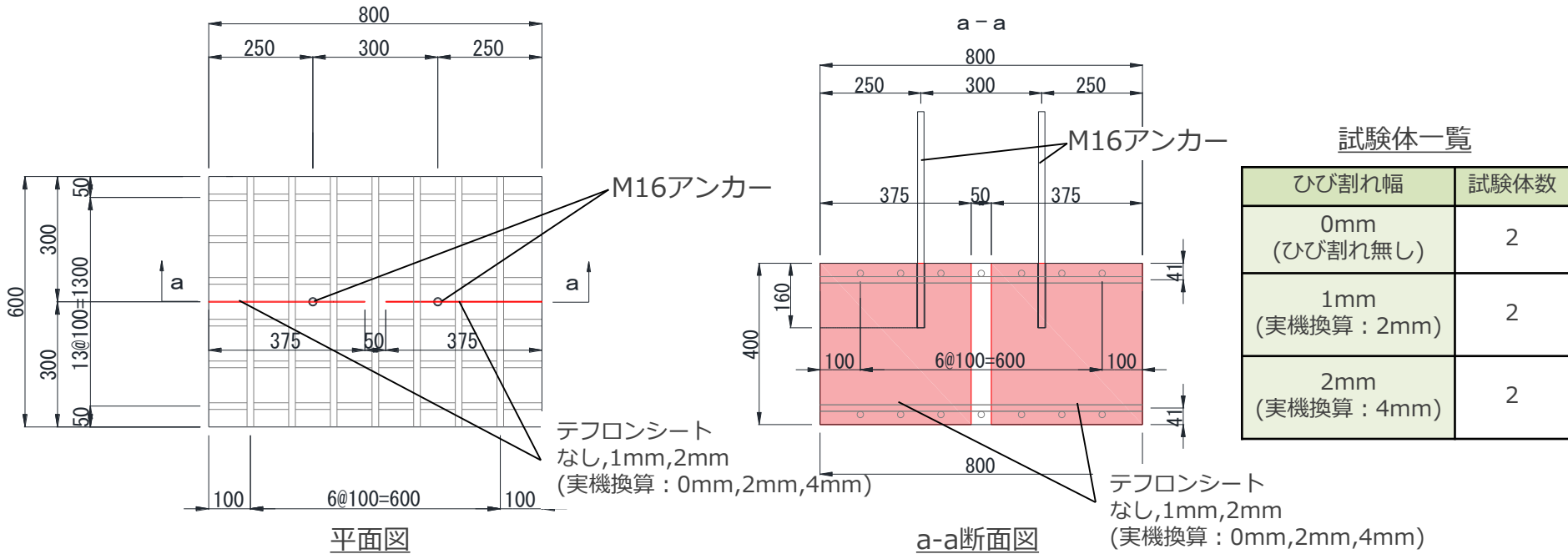
アンカーボルトの降伏強度(引張試験結果)

SNR490B	445 N/mm ²
---------	-----------------------

SCM435は高強度鋼のため降伏強度はなし

原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

■ 試験体概要 (せん断試験体)



試験体一覧

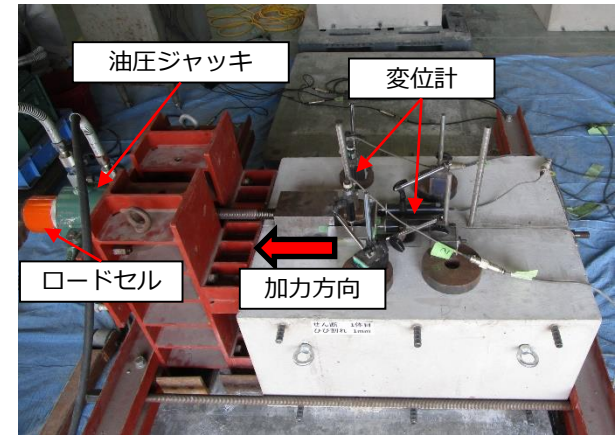
ひび割れ幅	試験体数
0mm (ひび割れ無し)	2
1mm (実機換算: 2mm)	2
2mm (実機換算: 4mm)	2



せん断試験体 打設前



せん断試験体

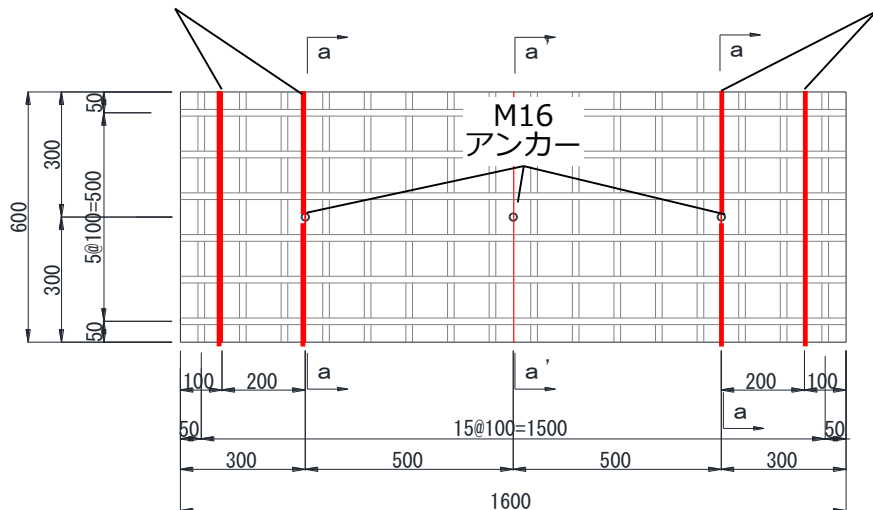


実験の様子

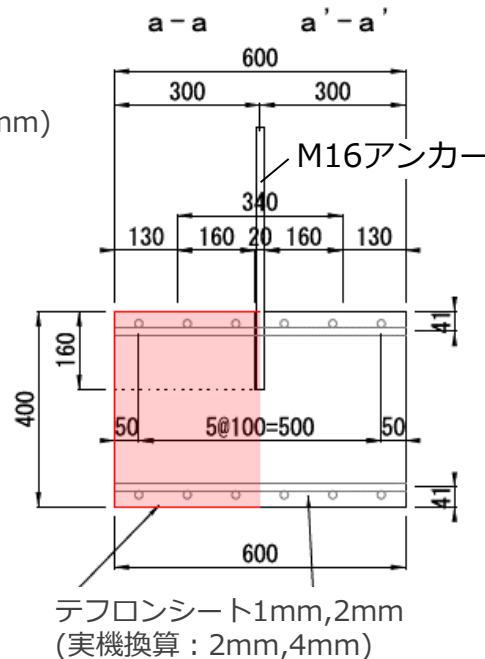
原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

■ 試験体概要 (引抜試験体)

デフロンシート 2mm(実機換算4mm) ひび割れなし (デフロンシートなし) デフロンシート 1mm(実機換算2mm)



平面図



a-a, a'-a' 断面図

試験体一覧

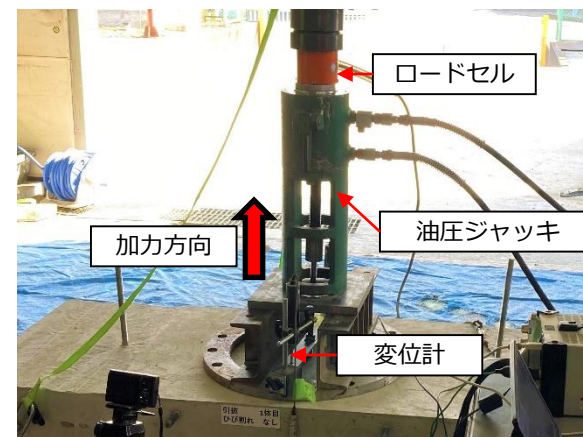
ひび割れ幅	試験体数
0mm (ひび割れ無し)	2
1mm (実機換算：2mm)	2
2mm (実機換算：4mm)	2



引抜試験体 打設前



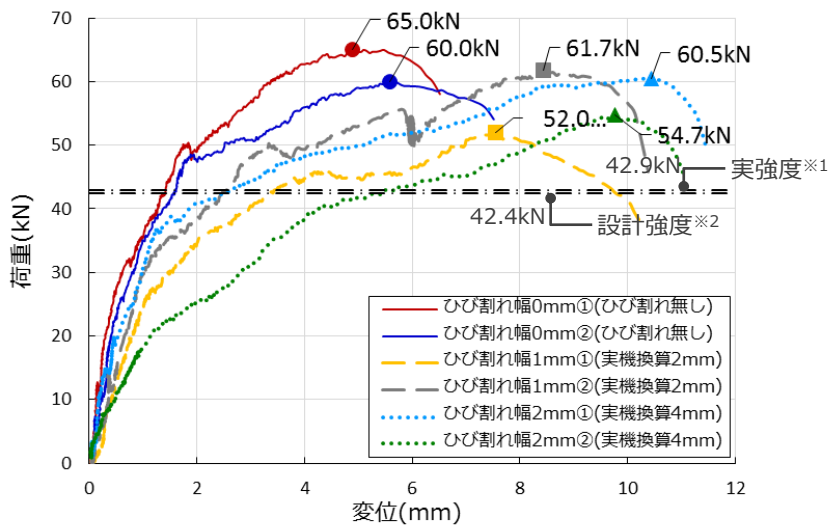
引抜試験体



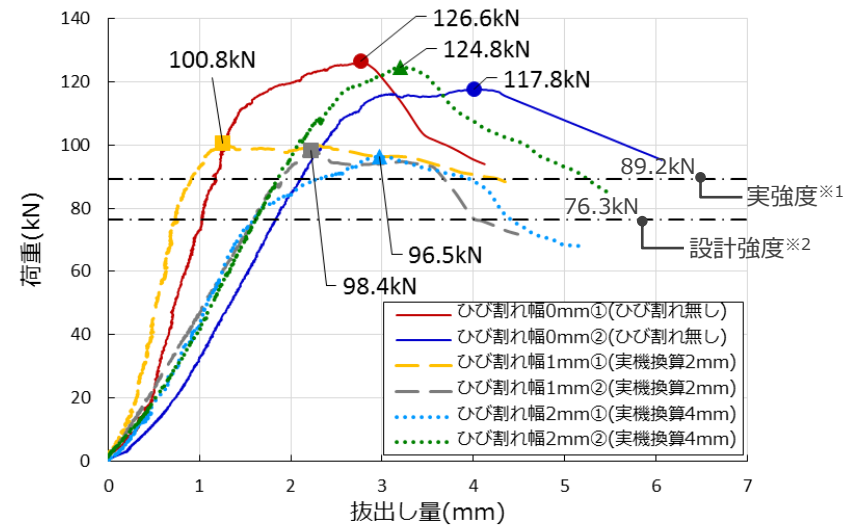
実験の様子

原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

■ 荷重変形関係

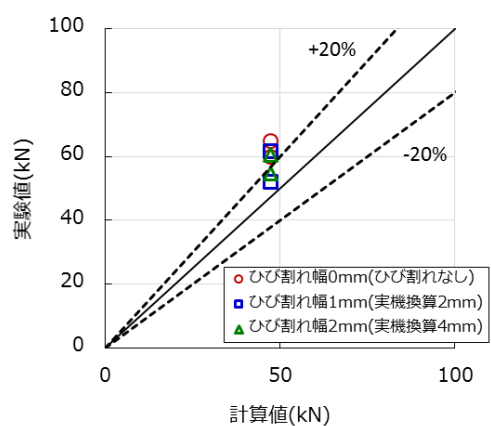


せん断実験結果

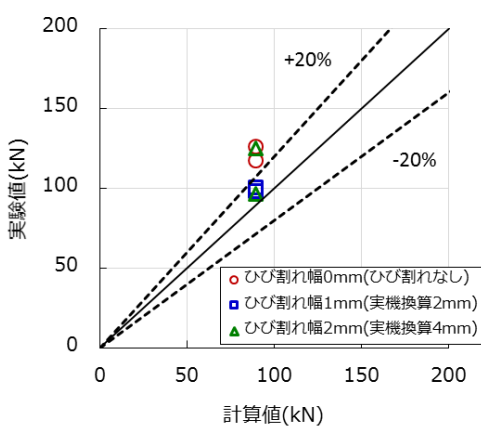


引抜実験結果

■ 最大値と実強度*1の比較

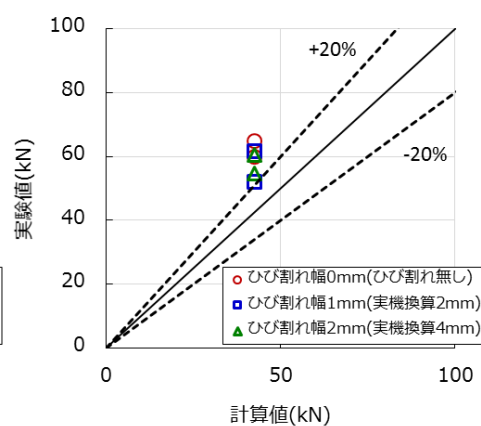


せん断実験結果

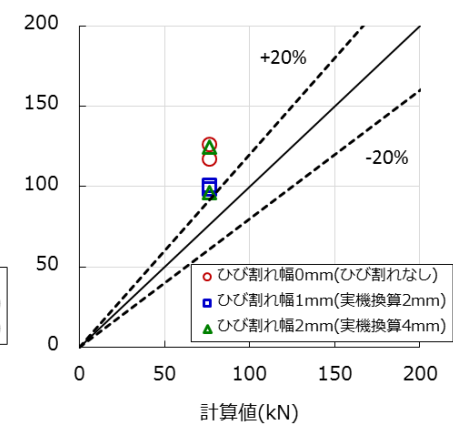


引抜実験結果

■ 最大値と設計強度*2の比較



せん断実験結果

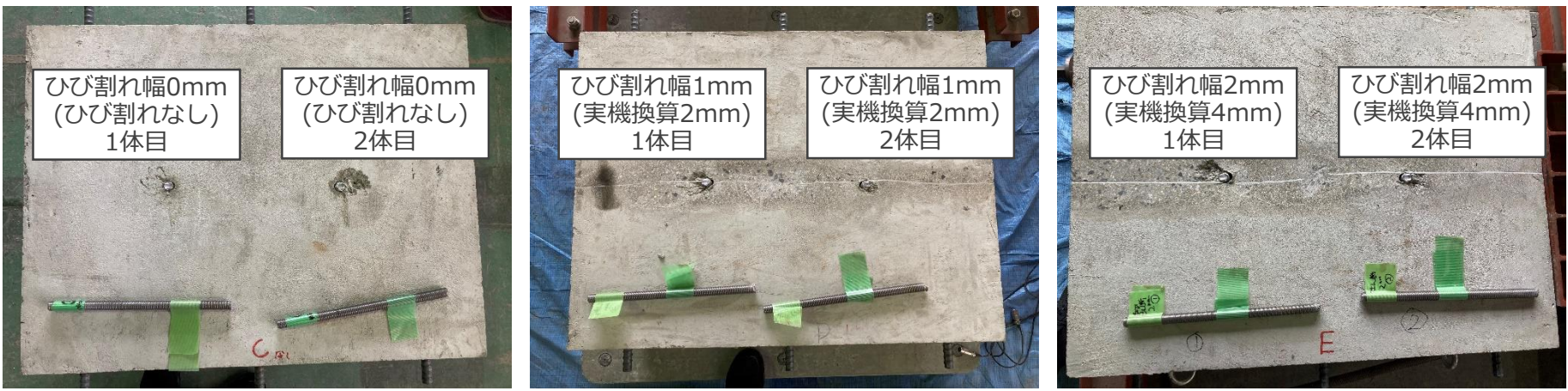


引抜実験結果

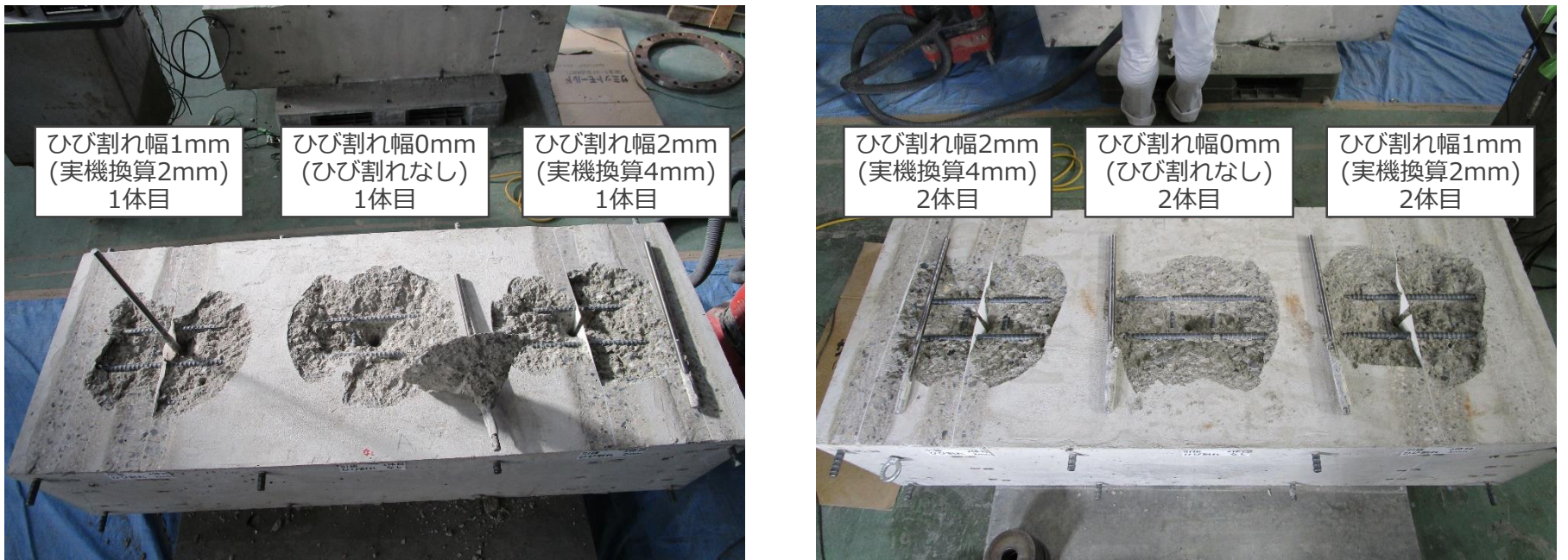
※ 1 : コンクリートの試験体実強度及び鉄筋の引張試験結果に基づき、実機設計式を用いて算定した終局強度
 ※ 2 : コンクリートの設計基準強度及び鉄筋の規格降伏点強度に基づき、実機設計式を用いて算定した終局強度

原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

破壊性状 (せん断試験体)



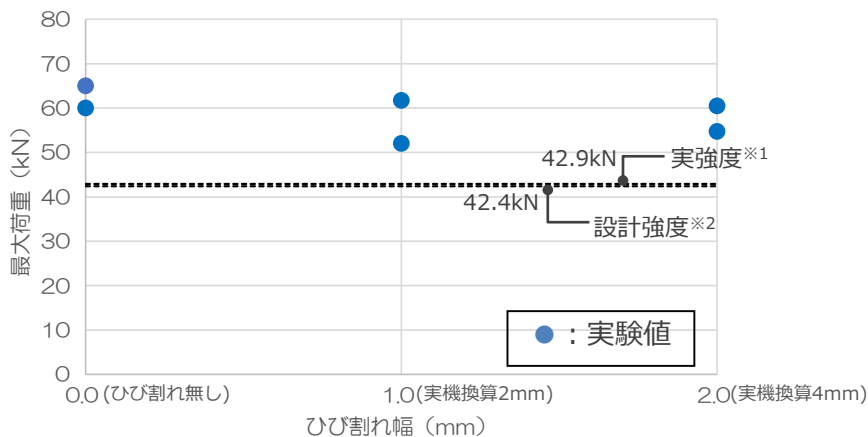
破壊性状 (引抜試験体)



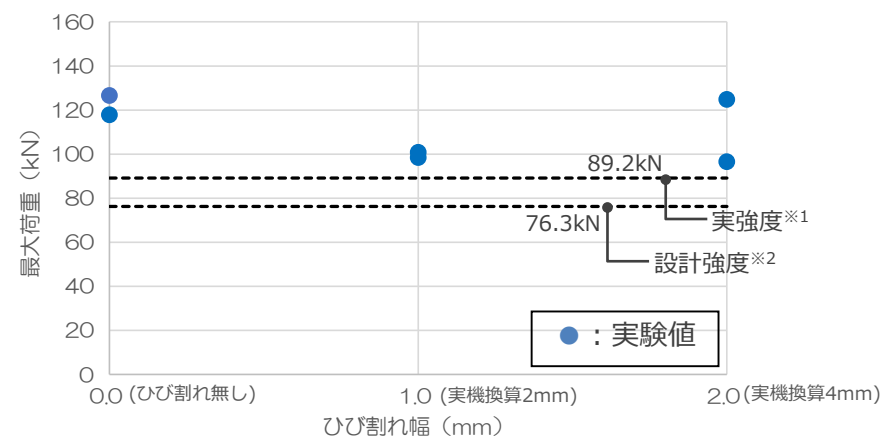
原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

■ まとめ (その1)

- せん断実験は、ひび割れの有無にかかわらず、実強度※¹及び設計強度※²に対して2~5割程度それぞれ実験値が高い結果となった。
- 引抜き実験は、ひび割れの有無にかかわらず、実強度※¹に対して1~4割程度、設計強度※²に対して3~6割程度それぞれ実験値が高い結果となった。
- いずれのケースにおいても、設計強度※²に対して実験値が高い結果となり、現状の設計クライテリアに十分な余裕があることを確認した。



a) せん断実験



b) 引抜き実験

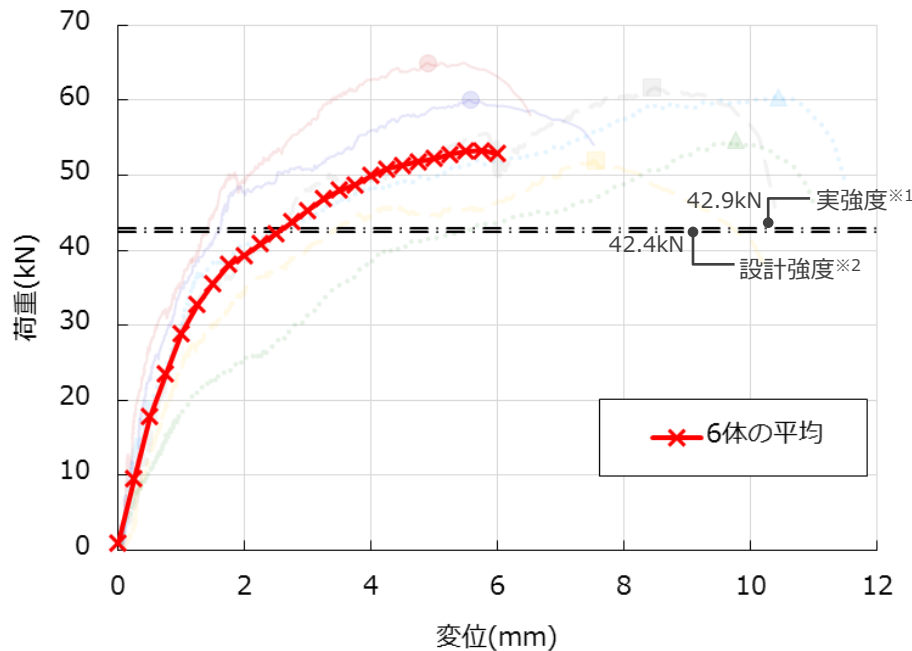
ひび割れ幅と最大荷重の関係

※ 1 : コンクリートの試験体実強度及び鉄筋の引張試験結果に基づき、実機設計式を用いて算定した終局強度
 ※ 2 : コンクリートの設計基準強度及び鉄筋の規格降伏点強度に基づき、実機設計式を用いて算定した終局強度

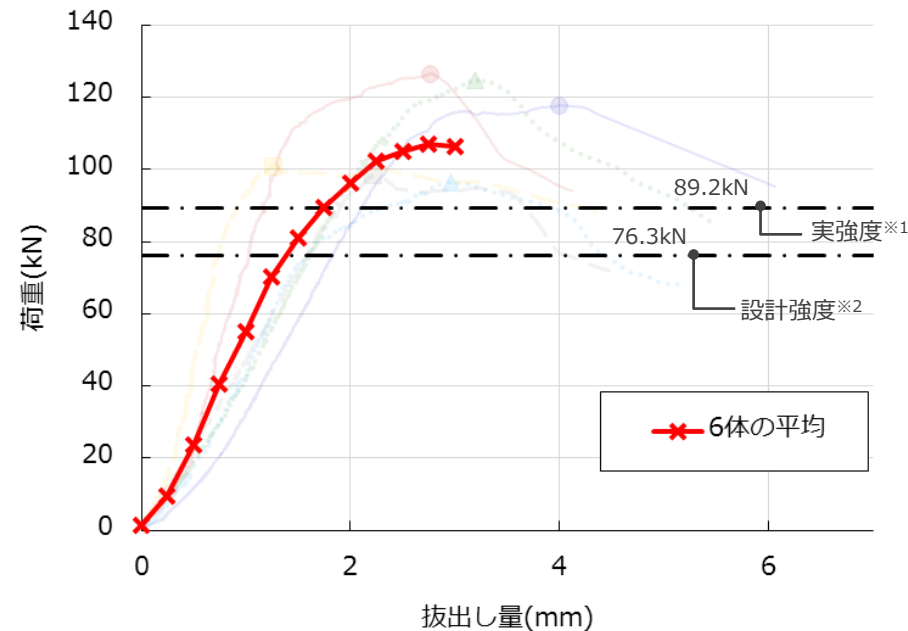
原子炉建屋の外壁調査計画（アンカー引抜き・せん断実験）

■ まとめ（その2）

- ひび割れの有無によって最大荷重が発現する時の変位が異なるが、同一変形時のマクロな荷重変形関係で整理しても、設計強度※2を十分上回っている。また、施工にあたっては、幅1mmを超えるひび割れは補修もしくはアンカー位置をひび割れと干渉しない位置へ見直すことから、個々のアンカーの変位は抑制され、十分な安全裕度が保持されている。



せん断実験結果



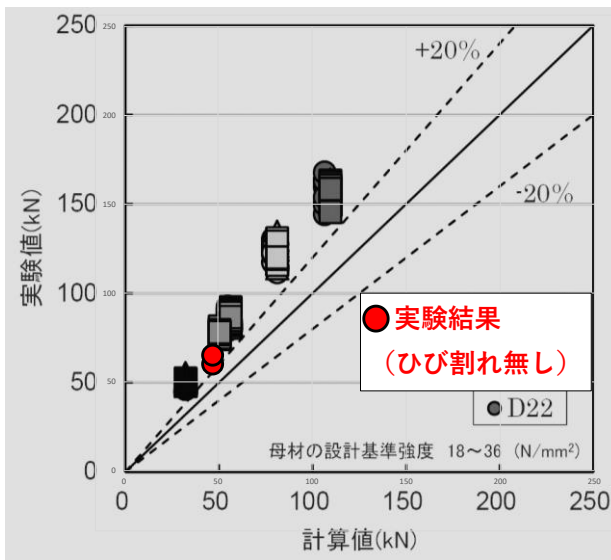
引抜断実験結果

※ 1 : コンクリートの試験体実強度及び鉄筋の引張試験結果に基づき、実機設計式を用いて算定した終局強度
 ※ 2 : コンクリートの設計基準強度及び鉄筋の規格降伏点強度に基づき、実機設計式を用いて算定した終局強度

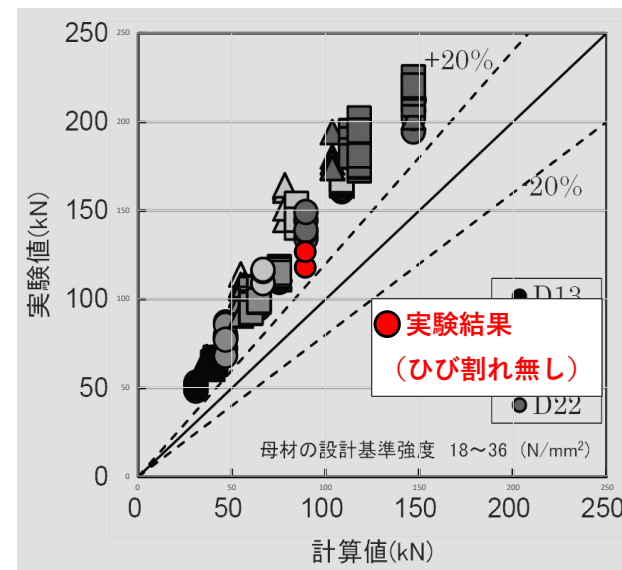
原子炉建屋の外壁調査計画（アンカー引抜き・せん断実験）

■ 参考（1/3）

- ひび割れ無しの試験体についてはせん断実験，引抜実験とも既往のセメフォースアンカーの実験結果と同様の傾向（設計値に対して2割程度の裕度を有する）が確認できた。



a) せん断試験



b) 引抜試験

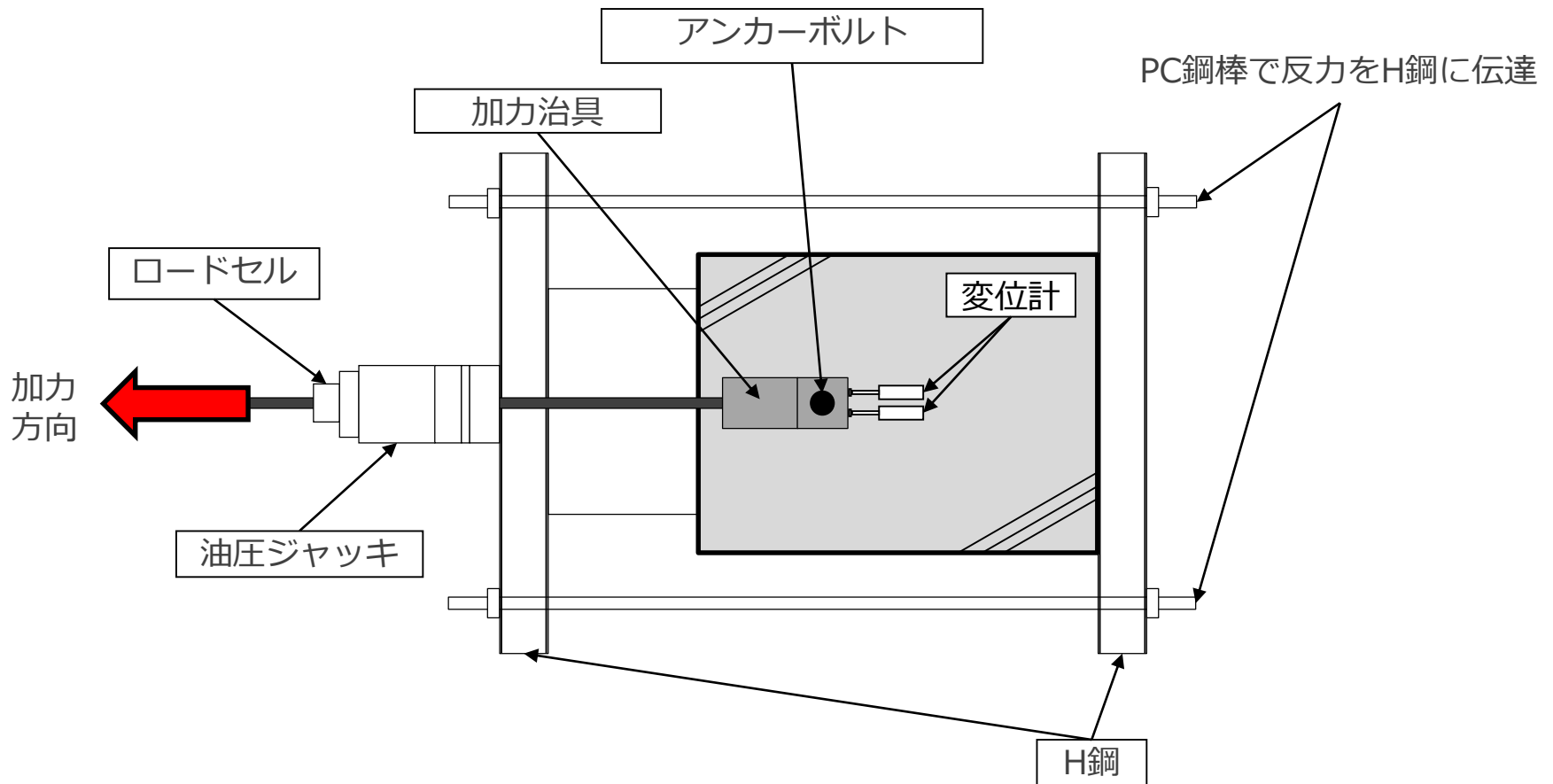
セメフォースアンカの既往実験結果※に本実験結果をプロット

原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

■ 参考 (2/3)

● せん断実験

下図の通り、アンカーボルトに加力治具と変位計を取り付け、水平方向変位の平均値をとることで、アンカーボルトの滑り変位を計測している



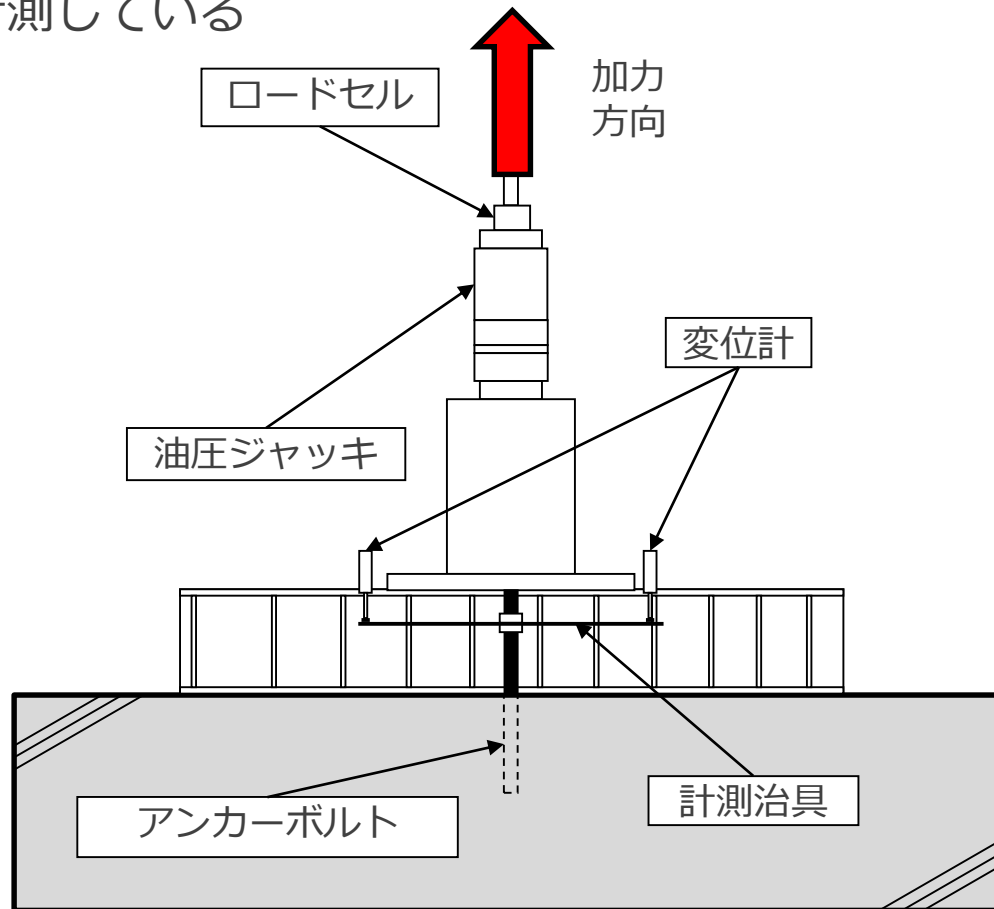
平面図

原子炉建屋の外壁調査計画 (アンカー引抜き・せん断実験)

■ 参考 (3/3)

● 引抜実験

下図の通り、アンカーボルトに計測治具と変位計を取付け、アンカーボルトの左右2カ所の鉛直方向変位の平均値をとることで、アンカーボルトの抜け出し量を計測している



立面図

原子炉建屋の外壁調査計画（クライテリアの設定）

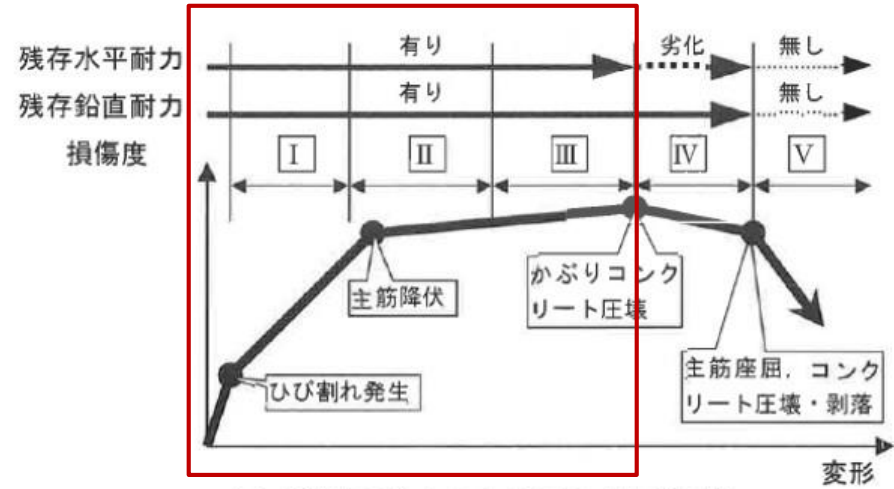
■ クライテリアの設定

● ひび割れ

- 外壁の構造性能に関するもの
水素爆発による損傷の場合、曲げ部材の損傷程度を考慮する必要があり、文献※¹によると、損傷度Ⅰ～Ⅲでは水平耐力と鉛直耐力はともにほとんど低下しないとされている。
このため、ひび割れ調査にあたっては損傷度Ⅳ以降の損傷が確認された場合には耐力低下影響の詳細評価を実施する。

表Ⅱ.2.3-1 損傷度分類の基準

柱、耐力壁の損傷度	損傷内容
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ（ひび割れ幅 0.2mm 以下）
II	肉眼ではっきり見える程度のひび割れ（ひび割れ幅 0.2～1mm 程度）
III	比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は極くわずかである。（ひび割れ幅 1～2mm 程度）
IV	大きなひび割れ（2mm を超える）が多数生じ、コンクリートの剥落も著しく鉄筋がかなり露出している。
V	鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱（耐力壁）に高さ方向や水平方向に変形が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜が見られるのが特徴。鉄筋の破断が生じている場合もある。



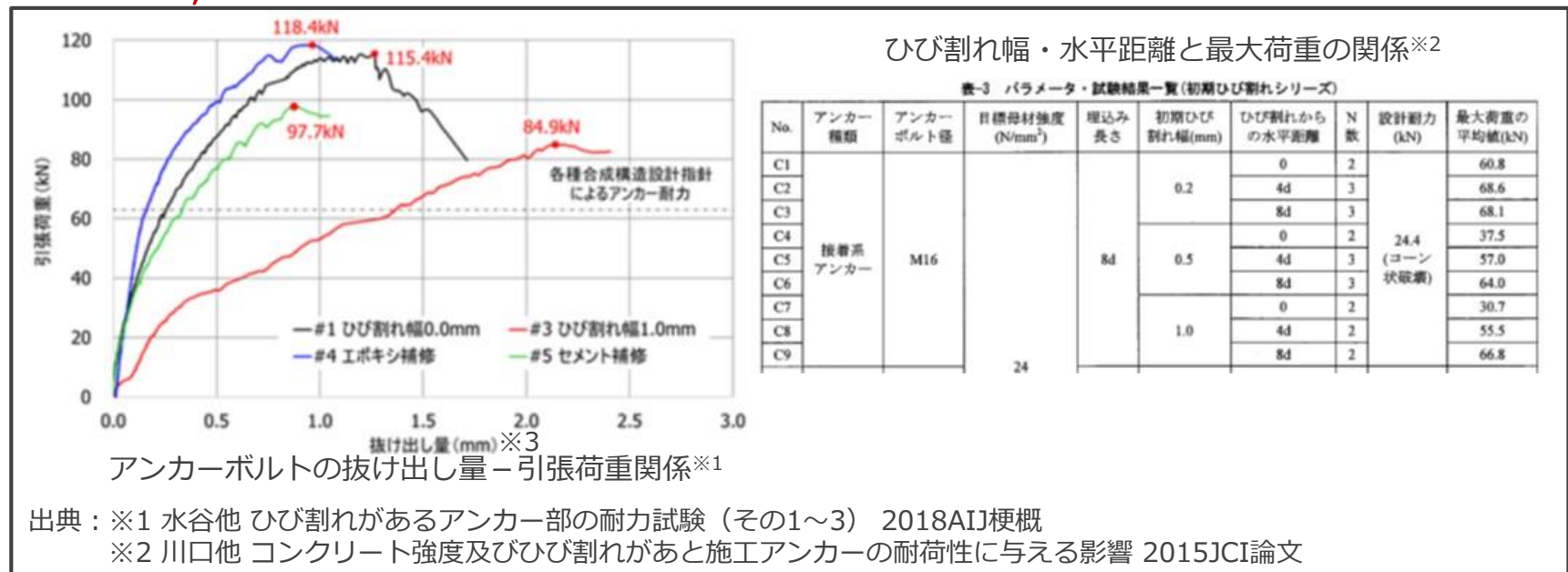
(a) 塑性変形能力のある部材（曲げ部材）

原子炉建屋の外壁調査計画（クライテリアの設定）

■ クライテリアの設定

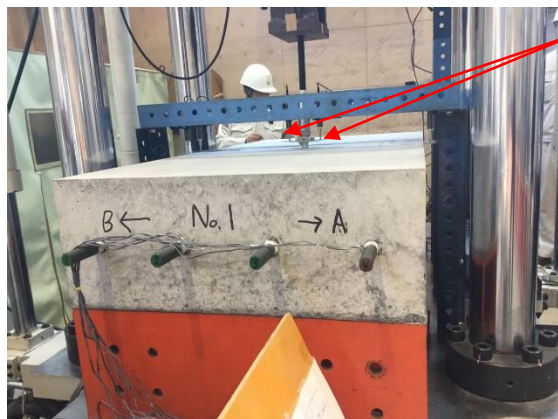
● ひび割れ

- アンカーの耐力に関するもの
文献※1,2によると、アンカーを貫通するひび割れについて1mm以下であれば、最大耐力は低下するものの各種合成構造設計指針によるアンカー耐力を満足する結果が得られている。また、アンカーを貫通しないひび割れは、アンカー耐力に有意な影響を及ぼすものではない結果となっている。よって、アンカー位置に1mmを超える貫通ひび割れが確認された場合は、アンカー位置を貫通しない位置に見直す。**ひび割れを避けられない場合は、ひび割れを補修する。**



■ アンカーボルトの抜け出し量の定義

- 中央の変位計 2 本平均の値を抜け出し量と称している。両脇の変位計は試験体全体の浮き等ないかを確認している。



中央の変位計2本



破壊状況（断面）



破壊状況（平面）

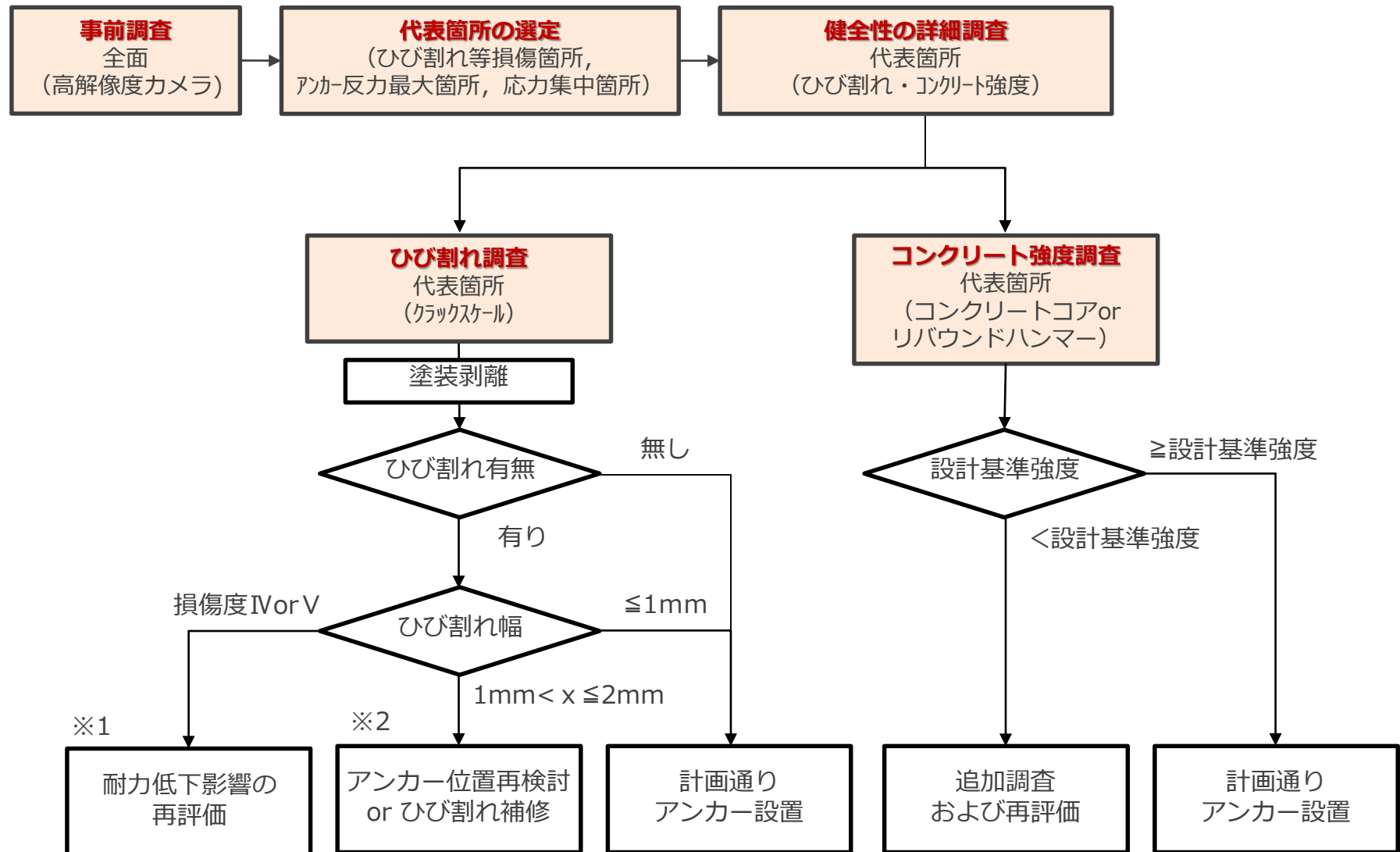
試験の状況（本論文とは別試験）

- 試験体#3（ひび割れ幅 1.0mm）では，コーンひび割れは貫通ひび割れの片側にだけ進展し，他方はひび割れ形成には至っていないものの，アンカーヘッドがコンクリートにかかっており，支圧によりコンクリートが破壊しているように観察できる。コーンが両側に構成される試験体に比べて，変形は大きくなるものの，AIJ 各種合成構造設計指針によるアンカー耐力を上回っている。

原子炉建屋の外壁調査計画（調査フロー）

- 文献調査に基づき，次ページ以降に示す調査フローを設定した。
- 代表箇所では，ひび割れ調査，コンクリート強度調査両方を行う。
 - ひび割れ調査
 - 外壁の構造性能に関するもの
「震災建築物の被災度被災度区分判定基準および復旧技術指針」（以下，「復旧技術指針」という）に基づき，損傷度ⅣまたはⅤを判定する。損傷度ⅣまたはⅤと判定した場合は，耐力低下影響の詳細評価を実施する。
なお，代表箇所において，損傷度ⅣまたはⅤに相当する損傷が確認された場合は，当該面・段の塗膜面に割れのある箇所もひび割れ調査の対象とする。
 - アンカー耐力に関するもの
アンカー設置位置を貫通する1mmを超えるひび割れが確認された場合はアンカー位置を再検討する。
ひび割れを避けられない場合は，ひび割れを補修する。
 - コンクリート強度調査
 - 各種合成構造設計に基づきアンカーの許容値を算定していることから，コンクリート強度が設計基準強度を上回ることを確認する。

原子炉建屋の外壁調査計画（調査フロー）

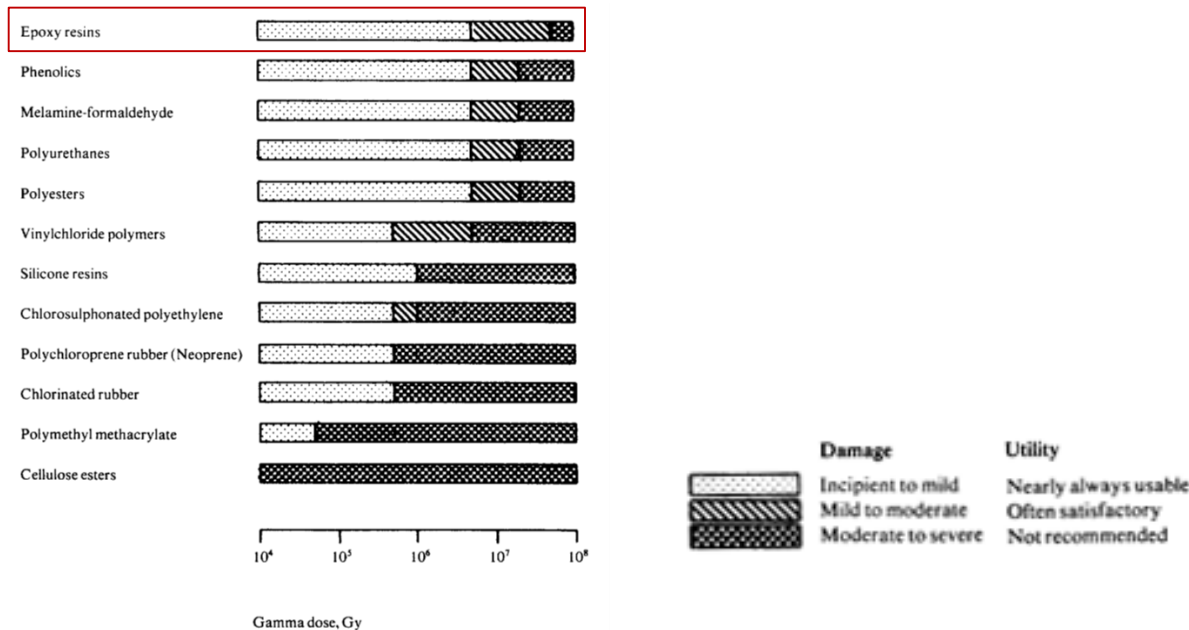


※1 損傷度IV・Vの損傷が確認された場合は、塗膜面に同様の割れがある箇所も追加調査する

※2 1mmを超えるひび割れが確認された場合は、塗膜面に同様の割れがある箇所は1mmを超えるひび割れがあるものとしてアンカー位置を再検討する

ひび割れ補修材料の耐放射線性について (1 / 2)

- 1 mmを超えるひび割れが確認された場合、「アンカー位置の再検討」もしくは、「ひび割れ補修」を実施する。ひび割れ補修をする場合は、エポキシ樹脂注入工法を採用予定である。
- ここでは、エポキシ樹脂の耐放射線性について評価を行う。



エポキシ樹脂の耐放射線性 (CERN, COMPILATION OF RADIATION DAMAGE TEST DATA PART III: Materials used around high-energy accelerators, 1982.)

⇒エポキシ樹脂の耐放射線性は、1 MGy程度以上の照射量から強度及び接着性等が劣化するとされている

ひび割れ補修材料の耐放射線性について（2 / 2）

- R/B4階外壁レベルで最大の空間線量は南側外壁で、16.2mSv/hである。
16.2 mSv/h=16.2 mGy/hとすると、1 MGyの照射量に達するには、7,000年以上※かかるため、エポキシ樹脂注入材に対する放射線の影響は極めて小さいと評価する。

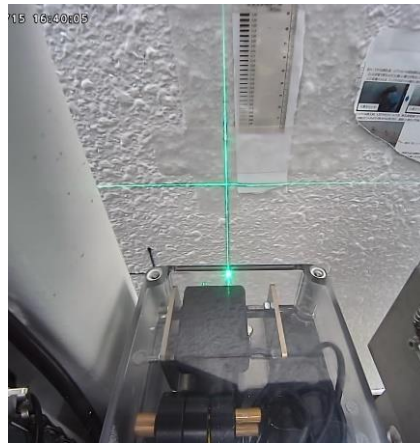
※
エポキシの耐放射線性は1MGy (=1,000,000Gy) とすると、
 $1,000,000\text{Gy} / (16.2\text{mGy} \times 1/1,000 \times 24\text{時間} \times 365\text{日}) \approx 7046\text{年}$

原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ調査）

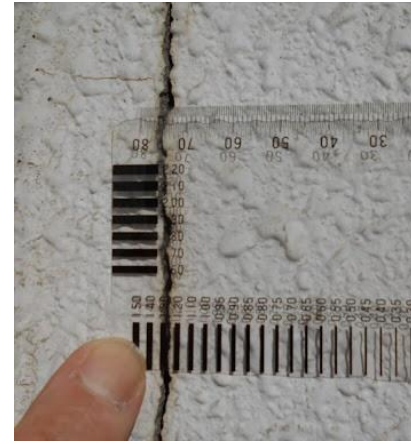
- 事前調査において選定した代表箇所について、塗膜を剥離し躯体表面のひび割れ幅をクラックスケールにより測定する。
- 塗膜の剥離は、ひび割れ等の痕跡に影響を及ぼさないよう、塗膜剥離剤を塗布した後にスクレーパー（人力）により剥離する。
- アンカー削孔時に削孔装置より打音調査を行い、コンクリート浮きを確認する。



アンカー削孔装置フレーム



アンカー削孔装置からの
調査イメージ



クラックスケールを用いた
ひび割れ幅調査イメージ



塗膜剥離のイメージ

原子炉建屋の外壁調査計画（コンクリート強度調査）

- 代表箇所では3本のコンクリートコアの強度試験を行い、コンクリートコアの強度が設計基準強度以上であることを確認し、健全性およびアンカー計画全体の見直し有無を判断する。
- 被ばく線量低減を目的とし、代表箇所のうち西2-2で実施するコンクリートコアの強度試験以降はリバウンドハンマーによるコンクリート強度調査（非破壊試験）を採用する。



コンクリートコアの採取



採取されたコンクリートコア



コア供試体の一軸圧縮試験

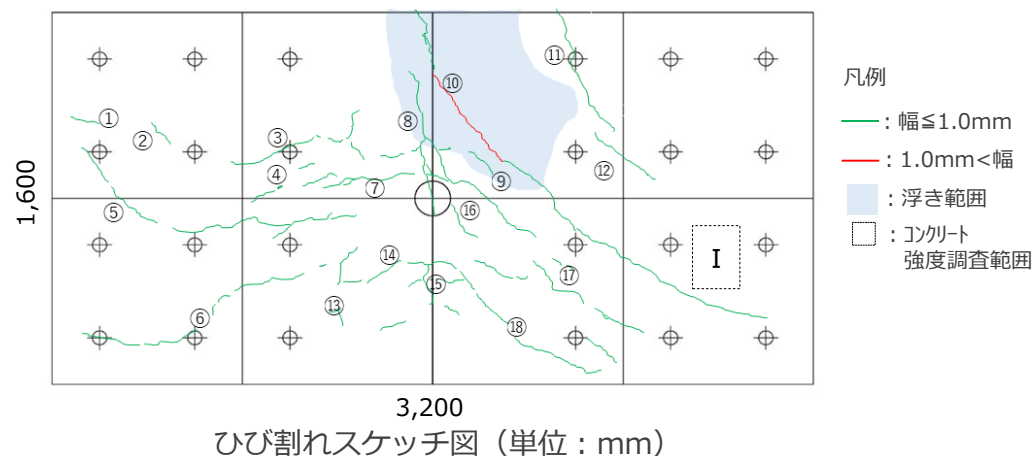
原子炉建屋の外壁調査計画（調査結果）

■ 西面の調査結果（西5-1）

- ひび割れ幅は最大1.3mmであった。
- 打音調査の結果コンクリートの浮きが一部認められたが、かぶり厚さ以内であることを確認した。
- リバウトハンマーによる推定強度は設計基準強度22.1N/mm²を上回った。

ひび割れ一覧表

No.	幅(mm)	塗膜面への表出
①	0.20	有
②	0.20	無
③	0.30	無
④	0.35	有
⑤	0.70	有
⑥	0.80	有
⑦	0.25	有
⑧	0.85	有
⑨	0.45	有
⑩	1.30	有
⑪	1.00	有
⑫	0.20	有
⑬	0.30	有
⑭	0.45	有
⑮	0.55	有
⑯	0.50	有
⑰	0.85	有
⑱	0.80	有



コンクリート強度調査結果一覧表

No.	リバウトハンマー-推定強度(N/mm ²)
I	35.6

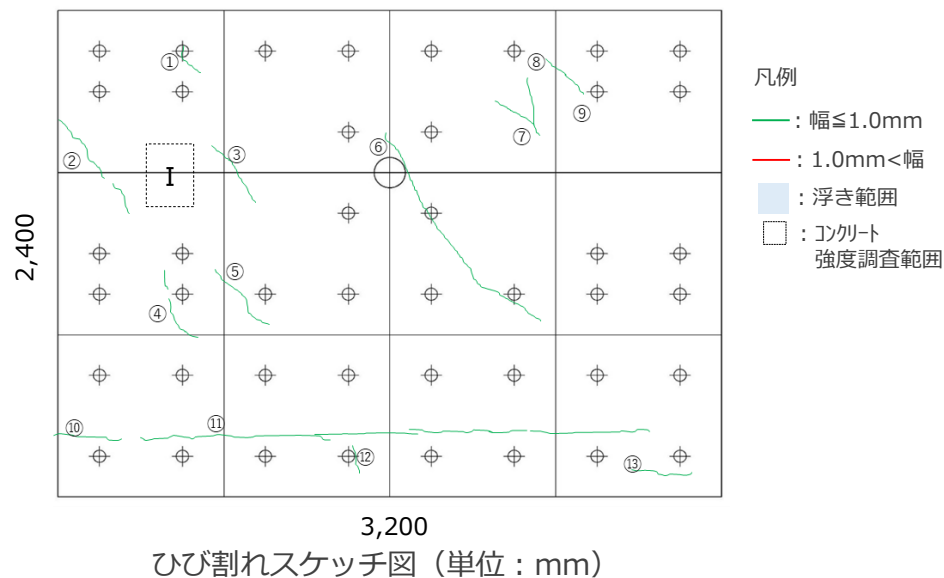
原子炉建屋の外壁調査計画（調査結果）

■ 西面の調査結果（西5-2）

- ひび割れ幅は最大0.8mmであった。
- リバウトハンマーによる推定強度は設計基準強度22.1N/mm²を上回った。

ひび割れ一覧表

No.	幅(mm)	塗膜面への表出
①	0.20	無
②	0.15	無
③	0.30	無
④	0.10	無
⑤	0.15	無
⑥	0.25	無
⑦	0.25	無
⑧	0.30	無
⑨	0.20	無
⑩	0.10	無
⑪	0.80	有
⑫	0.10	無
⑬	0.10	無



コンクリート強度調査結果

No.	リバウトハンマー-推定強度(N/mm ²)
I	38.8

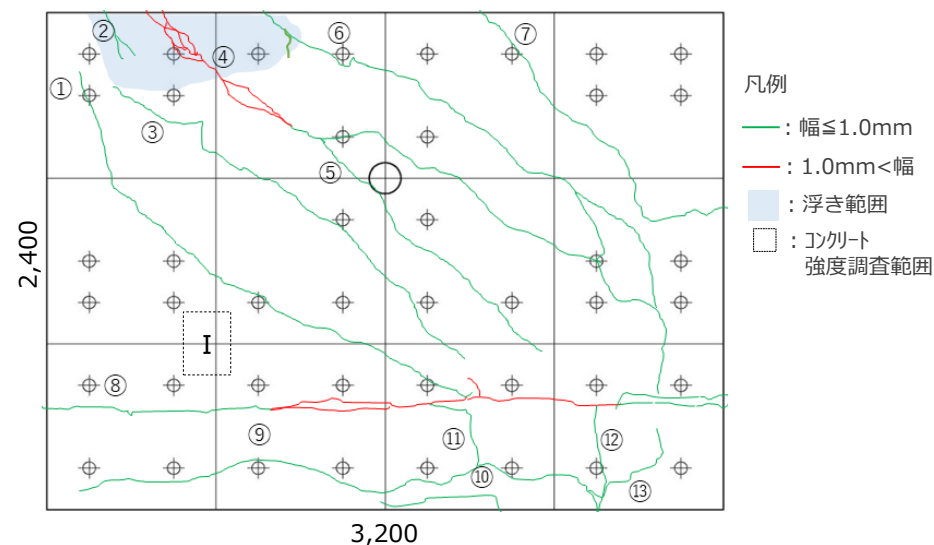
原子炉建屋の外壁調査計画（調査結果）

■ 北面の調査結果（北5-1）

- ひび割れ幅は最大1.6mmであった。
- 打音調査の結果コンクリートの浮きが一部認められたが、かぶり厚さ以内であることを確認した。
- リバウトハンマーによる推定強度は設計基準強度22.1N/mm²を上回った。

ひび割れ一覧表

No.	幅(mm)	塗膜面への表出
①	0.25	有
②	0.60	有
③	0.60	有
④	1.60	有
⑤	0.30	有
⑥	0.30	有
⑦	0.15	有
⑧	1.50	有
⑨	0.10	無
⑩	0.10	無
⑪	0.10	無
⑫	0.15	無
⑬	0.10	無



ひび割れスケッチ図 (単位: mm)

コンクリート強度調査結果

No.	リバウトハンマー推定強度(N/mm ²)
I	34.3

原子炉建屋の外壁調査計画（調査結果）

■ 調査結果まとめ（その1）

● ひび割れ調査

- 幅1mm超えのひび割れは計3本認められたが、最大ひび割れ幅は1.6mmであり、幅2mmを超えるひび割れは認められなかった。
- 打音調査の結果、コンクリートの浮きが2箇所認められたが、いずれも、かぶり厚さ以内であることを確認した。
- 幅0.5mm以上のひび割れは、事前調査で確認した塗膜面割れと一致しており、クライテリアとした1mm超えのひび割れは塗膜面の上から判断が可能であることを確認した。
- 内部損傷状況を確認するため、浮きが確認された2箇所について浮き部分を取り取り再度打音調査を行い異音がない（問題がない）ことを確認した。また、ひび割れの評価にあたっては貫通ひび割れを考慮していることから、内部損傷状況調査のための非破壊試験は省略する。

● コンクリート強度調査

- リバウンドハンマーによる推定強度は、いずれも設計基準強度である22.1N/mm²を上回った。

原子炉建屋の外壁調査計画（調査結果）

■ 調査結果まとめ（その2）

● 調査結果を受けた対応と考察

- 幅1mmを超えるひび割れはエポキシ補修もしくはアンカー位置をひび割れと干渉しない位置へ見直す。なお、前述したアンカー引抜き・せん断実験では、ひび割れ幅4mmの貫通ひび割れがあったとしても、強度上問題ないことを確認している。
- 浮きが認められた部分は、すべて研り取りモルタルを充填する。
- ひび割れや浮きが認められたものの、局所的であり、耐震壁としての性能を保持していると評価する。

● 今後のアンカー設置への展開

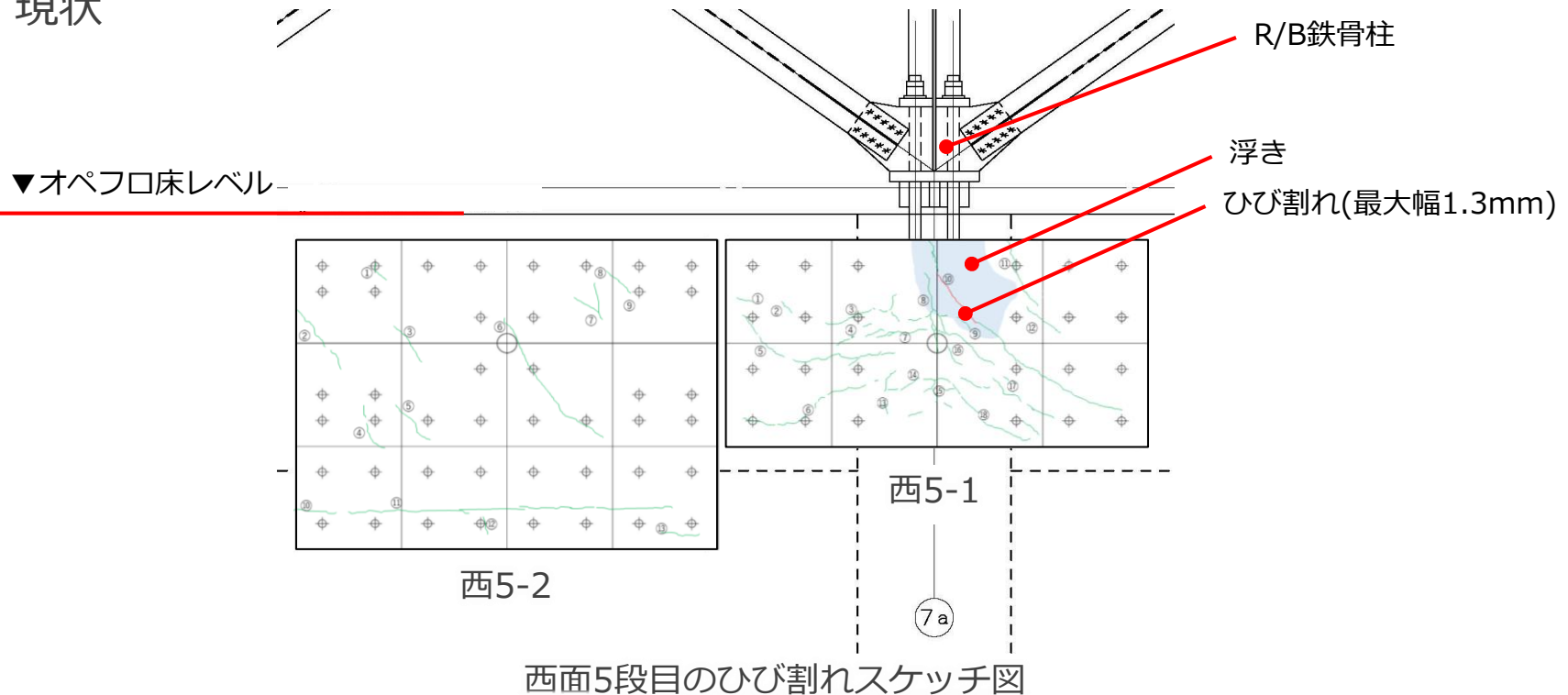
- 塗膜面に割れが存在する箇所の塗膜を局所的に剥離し、ひび割れ幅が1mmを超える場合はエポキシ補修もしくはアンカー位置をひび割れと干渉しない位置へ見直す。
- アンカー削孔前にアンカー削孔装置から打音調査を行い、かぶり厚さより深い浮きが認められた範囲は、アンカー位置を浮きと干渉しない位置へ見直す。浮きが認められる範囲は深さによらず、すべて研り取りモルタルで充填する。

原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

ひび割れ発生要因の推定

西面5段目の調査結果を代表として、分析結果を示す。

● 現状



● 地震によるひび割れ

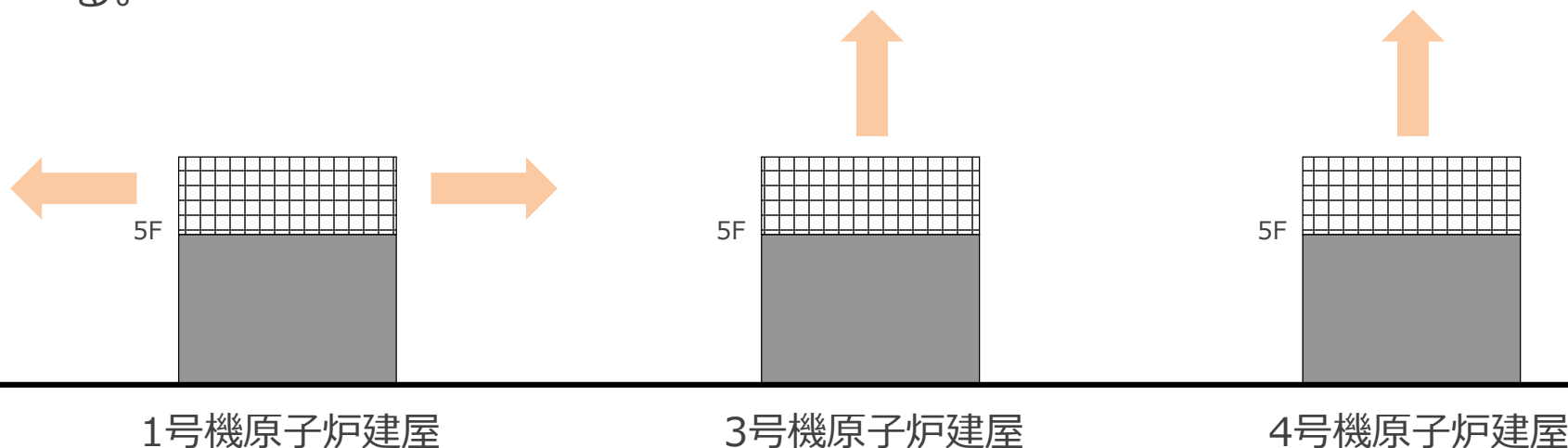
東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた1号機R/Bの地震応答解析の結果、耐震壁のせん断ひずみは第一折点以下であり、ほぼ弾性範囲内であったことから、地震の影響はないと評価している。

（※実施計画Ⅲ章1.3地震及び津波への対応）

原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

■ 水素爆発について

- 当社は、1号機の水素爆発に係わる解析を通じ、水素爆発は5階で始まったと推定している。
- 1号機は5階（オペフロ）の壁が鉄骨構造に鋼板（外装材）を取り付けた構造形式であり、水素爆発の内圧に対して壁の部分が非常に脆弱であったため、この部分が先行破壊して4階以下に爆発が大きく広がる前に内圧を解放したと考えられる。
- 一方、3、4号機は壁が鉄筋コンクリート構造でできており、1号機の5階壁のような脆弱な構造がないことから、1号機よりも爆発による圧力上昇が大きくなったと思われる。
- 以上より、1号機の4階以下の損傷は3、4号機と比較し軽微であったと考えられる。



原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

■ 水素爆発によるひび割れ発生要因の一覧（詳細は後述）

推定要因	事象概要	応力分布	ひび割れ形態	判定
オペフロ口鉄骨柱の押し出し	水素爆発により、外壁および鉄骨柱へ面外方に荷重が生じ、鉄骨柱を固定している柱脚アンカーボルト等を介して外壁へひび割れや浮きが生じた。			○可能性あり
オペフロ口外装材の破損	水素爆発により、外装材が外れたことにより埋込金物や差し筋を介して外壁上部を境界に引き剥がすせん断力が生じひび割れや浮きが生じた。			○可能性あり
4階大梁の外壁押し出し	水素爆発により、床や梁へ鉛直方向へ押し出す力が生じ、大梁を介して外壁へひび割れが生じた。			○可能性あり
水素爆発の爆風	水素爆発により、4階外壁に面外方法へ押し出す力が生じ、外壁へひび割れが生じた。			×可能性なし
水平打ち継ぎ部の乖離	水素爆発により、オペフロ口近傍の大梁と外壁の水平打ち継ぎ部に局所的な乖離が生じた。			○可能性あり

原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

■ オペフロ鉄骨柱の押し出しによるもの

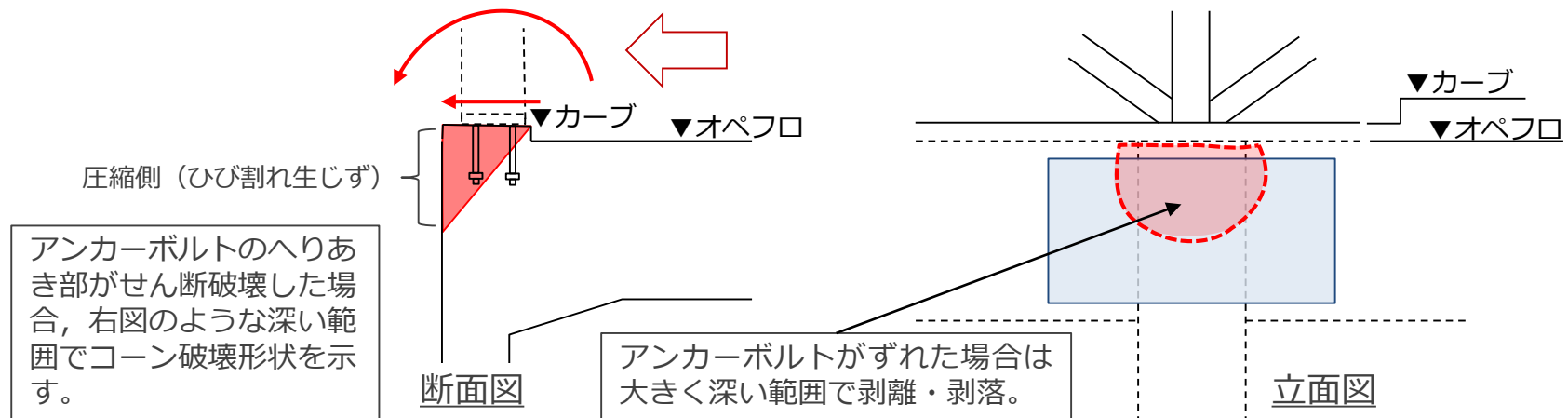
● 推定事象

- ① 5階（オペフロ）での水素爆発の爆風により、外壁及び鉄骨柱に面外方向の荷重が生じた。
- ② これにより、オペフロ床に埋設された鉄骨柱を固定しているアンカーボルトを介して4階外壁へ柱脚より曲げモーメント及びアンカーボルトより外壁を引き剥がすせん断力が生じた。

● 応力分布およびひび割れ形態の推定

屋外側は、鉄骨からの曲げモーメントで圧縮側となるため、ひび割れが生じない。一方で、せん断力でアンカーボルトがずれた場合、大きく深い範囲での剥離・剥落を生じる。したがって、実機とは一致していないが、若干のせん断力は伝わり、他の要因と併せて生じるひび割れ発生の可能性はある。

水素爆発により面外方向の荷重が発生



原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

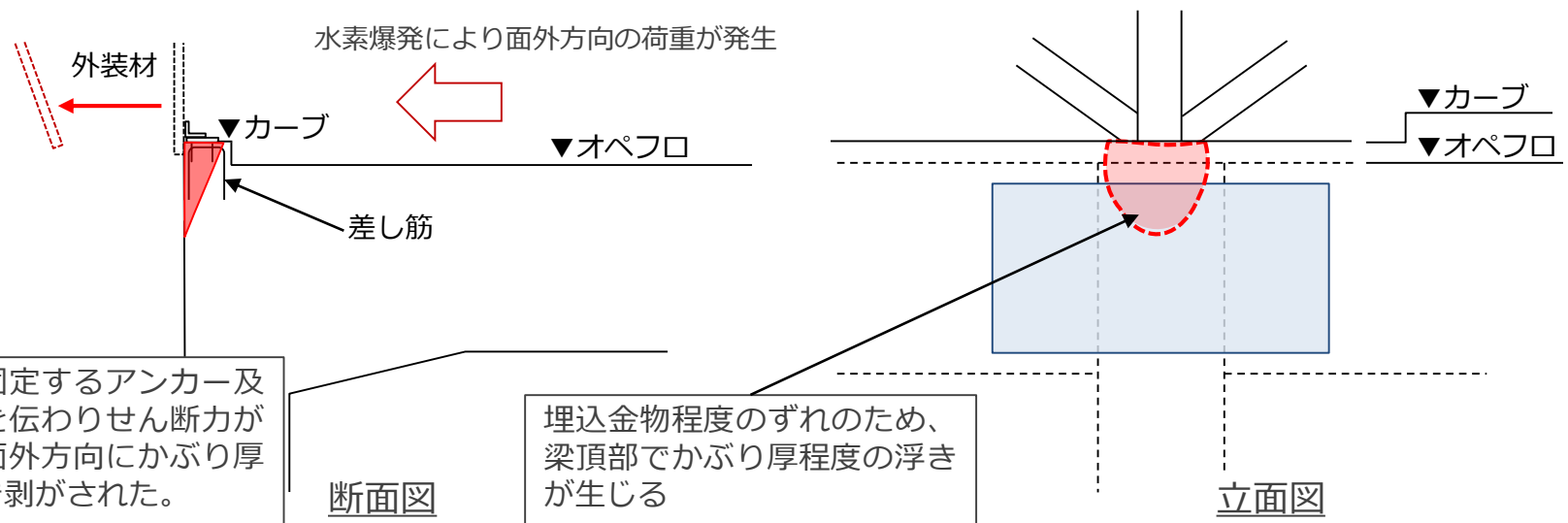
■ オペフロ外装材の破損によるもの

● 推定事象

- ① 5階（オペフロ）での水素爆発の爆風により、外装材に面外方向の荷重が生じた。
- ② これにより、外装材が外れ、オペフロ床立ち上がり部に埋設された外装材を固定している埋込金物や差し筋を介して外壁上部を境界に引き剥がすせん断力が生じた。

● 応力分布およびひび割れ形態の推定

せん断力で埋込金物がずれた場合、外壁頂部から浅い深さの浮き及びそれに伴うひび割れが生じると考えられる。したがって、かぶり厚さ程度の浮き及び浮きに伴う割れ程度であるため、実機とは一致している。



原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

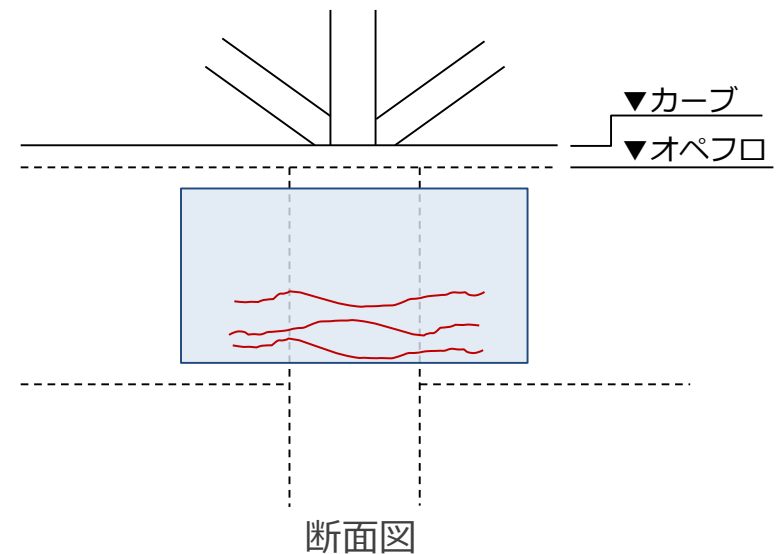
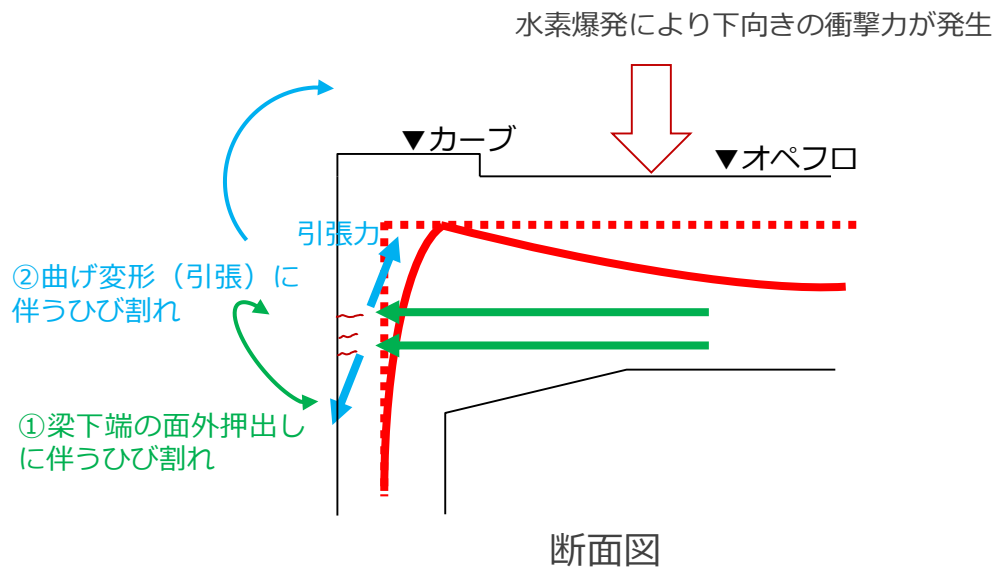
■ 4階大梁の外壁押し出しによるもの

● 推定事象

- ① 5階（オペフロ）での水素爆発の爆風により、当該部に直交する大梁に鉛直方向に荷重が生じた。
- ② その結果、梁下端の定着筋等により面外に押し出す力が生じ、当該部にひび割れが生じた。

● 応力分布およびひび割れ形態の推定

外壁の屋外側に①面外押し出しに伴う曲げひび割れや、②曲げ変形に伴う引張力が生じるため、外壁面に水平方向等に複合的なひび割れが生じる。したがって実機と概ね一致している。



原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

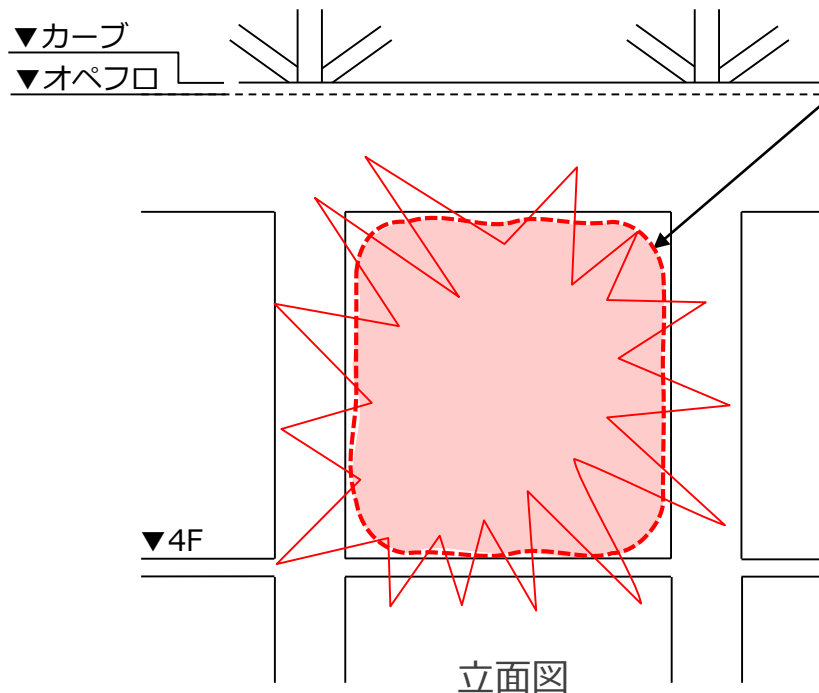
■ 水素爆発の爆風を受けたことによるもの

● 推定事象

① 水素爆発の爆風により、4階外壁に面外方向へ押し出す力が生じ、外壁へひび割れが生じた。

● 応力分布およびひび割れ形態の推定

水素爆発の爆風によるものであれば、3号機及び4号機の事例から推定すると、ひび割れだけの損傷に留まらず、壁全体の剥落・剥離・崩落が考えられる。したがって、実機と一致していない。



柱・梁の比較的剛部材で囲まれた壁は剥落、剥離、崩落の可能性がある。（柱・梁も大きく損傷）



参考 4号機R/Bの損傷状況

原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

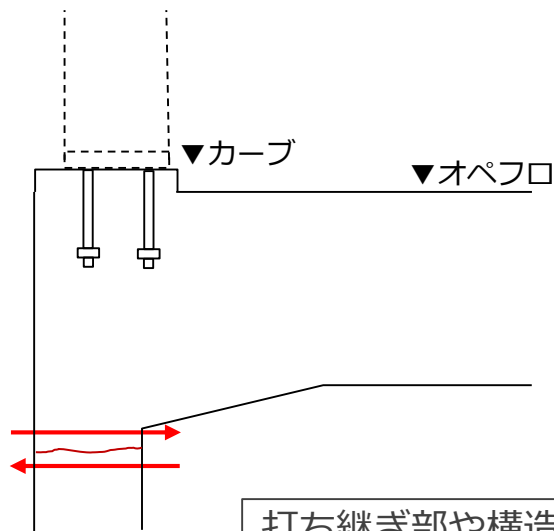
■ 水平打ち継ぎ部の乖離によるもの

● 推定事象

① 水素爆発の爆風により、オペフロ近傍の外壁と大梁の水平打ち継ぎ部に局所的な乖離が生じた。

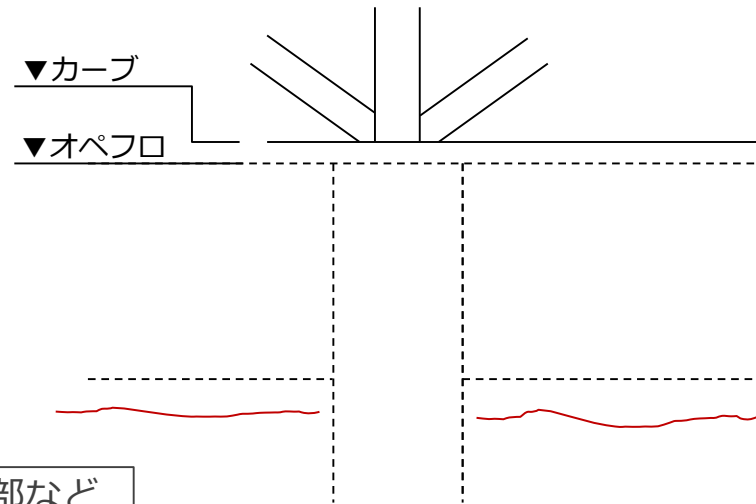
● 応力分布およびひび割れ形態の推定

外壁面が屋外側に若干膨らみ、打ち継ぎ部に沿ったひび割れを生じる。特に収縮ひび割れ等で元々ひび割れのあった箇所のひび割れ幅が目開き等で多少大きくなると考えられる。したがって、実機と一致している。



打ち継ぎ部や構造切り替わり部などの構造的弱点部に局所応力が発生。

断面図



立面図

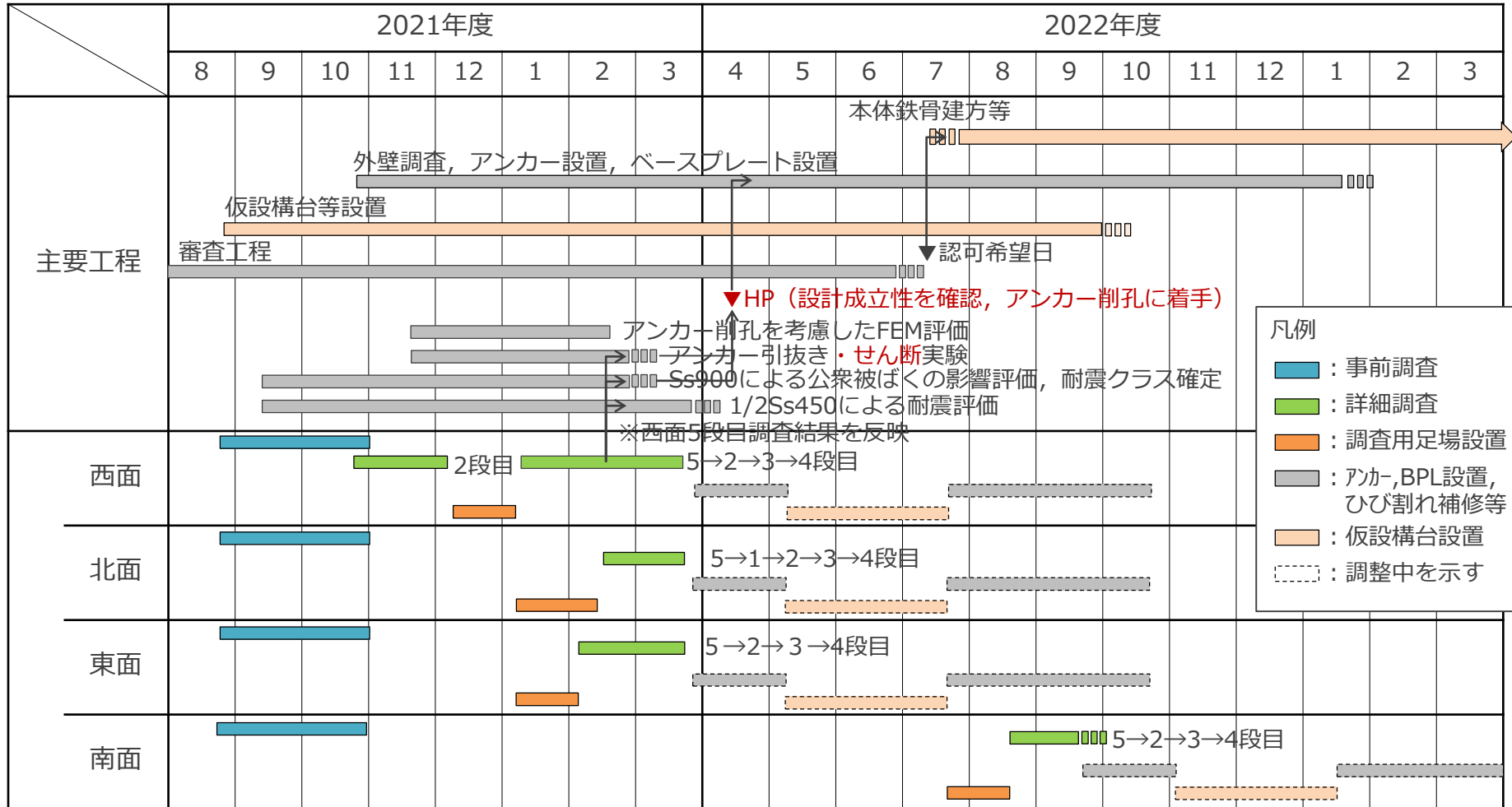
原子炉建屋の外壁調査計画（ひび割れ発生要因の推定）

■ ひび割れ発生要因のまとめ

- 実機のひび割れや浮きは、オペフロ直下かつオペフロ柱下部に集中していることから、推定した発生要因のうち以下の要因が複合して生じたものであると推定した。
 - ① オペフロ鉄骨柱の押し出しによるもの
 - ② オペフロ外装材の破損によるもの
 - ③ 4階大梁の外壁押し出しによるもの
 - ④ 水平打ち継ぎ部の乖離によるもの
- なお、西面の損傷が顕著であった理由は、外壁に直行する間仕切り壁が独立する間仕切り壁のみであることや、5階（オペフロ）には東面のみブローアウトパネルが存在したことも関係していると推定した。
- 推定した発生要因では、外壁の損傷は表層に局所的なひび割れや浮きを発生させるものであり、外壁調査結果からも内部の損傷には至っていないと評価する。

原子炉建屋の外壁調査計画（スケジュール）

- アンカー削孔を考慮したFEM評価及びアンカー引抜き実験， Ss900による公衆被ばくの影響評価（Ss900を用いた大型カバーおよび原子炉建屋の解析）， 外壁調査を完了した。

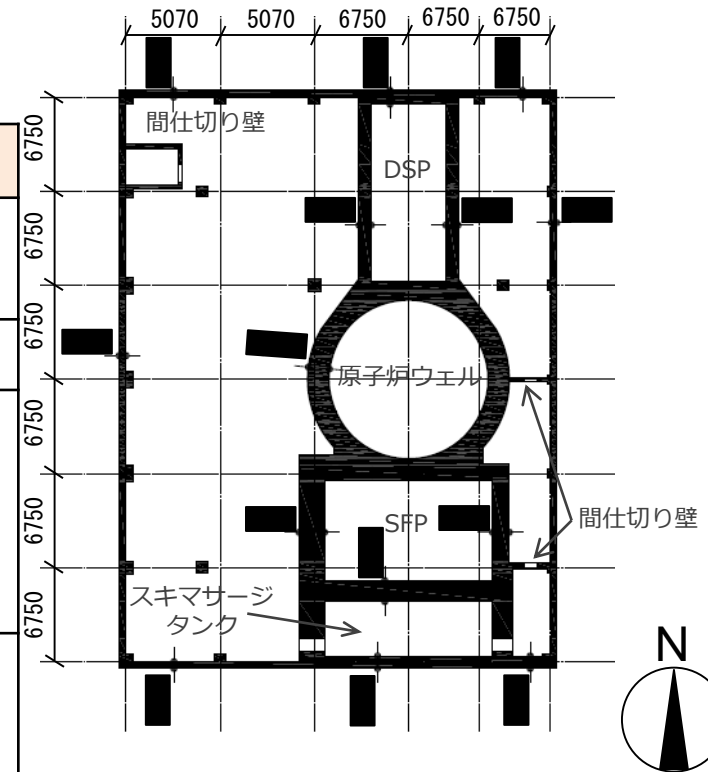


※周辺工事との調整や現場状況等を踏まえて, 工程は変更となる可能性がある

外壁調査（4階）における西面の代表性について

- 外壁調査（4階）における西面の代表性（水素爆発の影響）について、「壁厚」「スパン」「外壁と直行する壁」「事前カメラ調査結果」から、評価する。

	西面	東面	北面	南面
壁厚(mm)	■	■	■ ■	■ ■
スパン(mm)	6750	6750	5070	5070
外壁と直行する壁	間仕切り壁（独立）	間仕切り壁（SFP, 原子炉ウエルに接続）	DSP壁	スキマサージタンク壁
事前カメラ調査による塗膜面の割れ	多	少	少	少



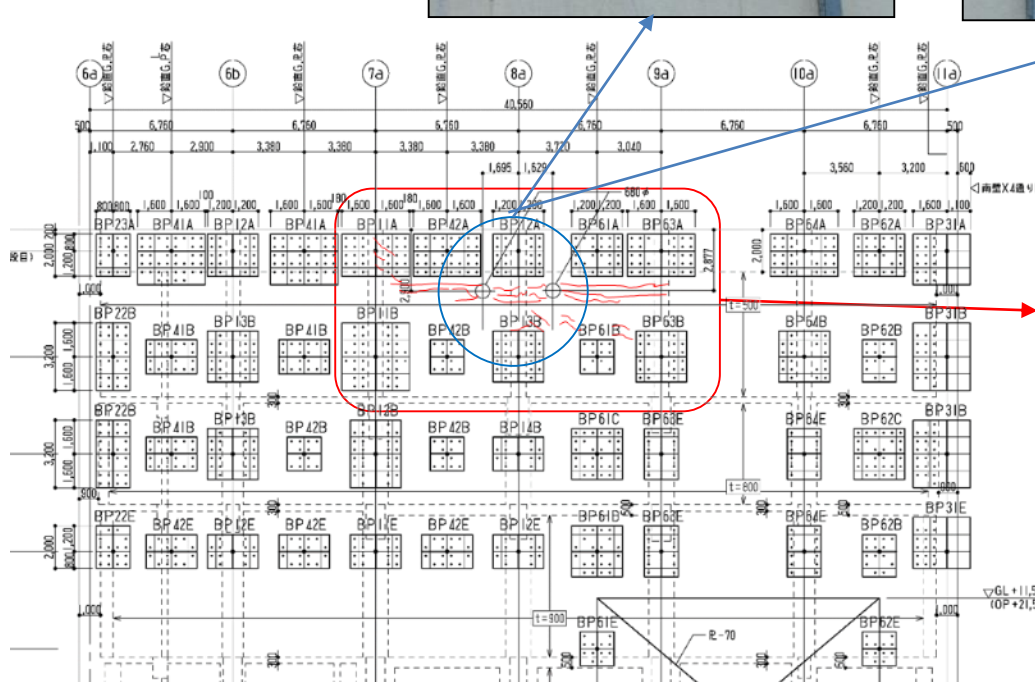
1号機原子炉建屋4階平面図

⇒西面と東面は同スパンであり、壁厚も同程度である。一方、外壁と直行する壁は西面が独立した間仕切り壁のみであること、さらに、事前カメラ調査による塗膜面の割れが多いことから西面を代表面とする

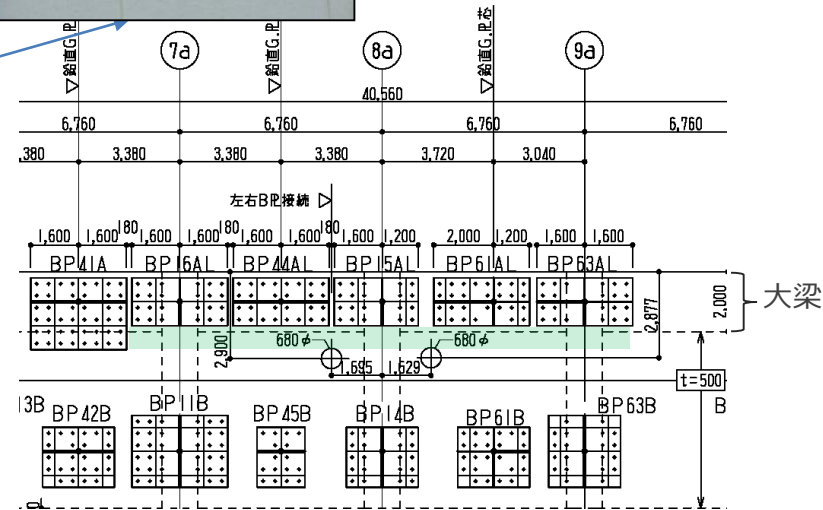
R/Bへのアンカー設置 (壁の現状とアンカー配置計画)



- 1号機原子炉建屋の今までの確認の結果から、アンカーについては、顕著なひび割れや剥離が確認できる箇所を避ける等の処置を行っている。



R/B西側アンカー設置計画図 (変更前)



◆当該部の設計上の処置

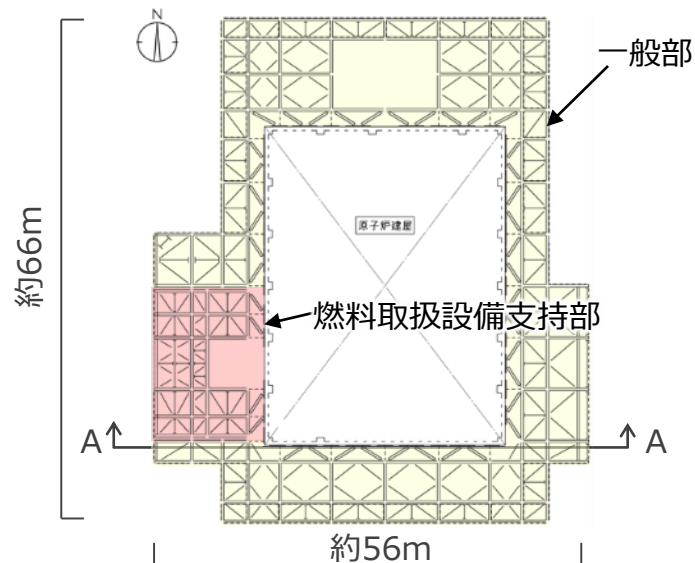
- 1) ひび割れ集中部の外壁アンカーを上部大梁へ集約
- 2) 大梁部のアンカー長を長くし, 耐力増強
- 3) 一部のベースプレートでアンカー本数増設

R/B西側アンカー設置計画図 (変更後)

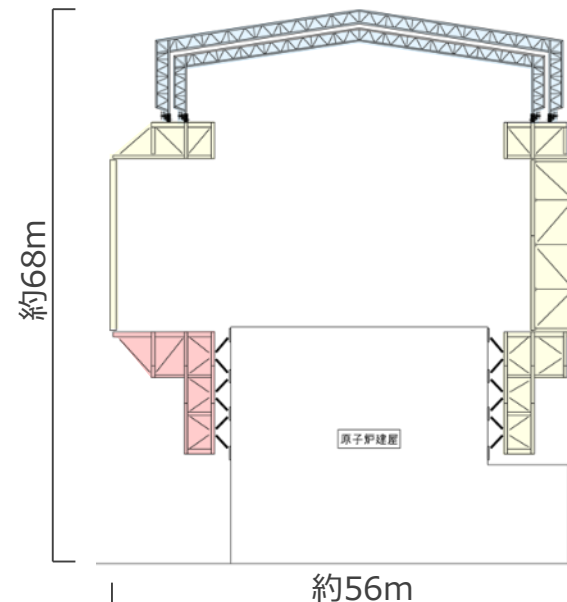
大型カバーの設計条件

大型カバーの設計条件は以下の通り

- 大型カバーの一部架構が燃料取扱設備を間接的に支持する構造物であるため、大型カバー全体として建築基準法に定められた地震力の1.5倍を考慮（3，4号機と同様）する。
- 基準地震動 S_s に対する耐震安全性を確認し，原子炉建屋や使用済燃料プール，使用済燃料貯蔵ラックへの波及的影響を防止する。
- ガレキ撤去や使用済燃料プールからの取り出し作業に支障が生じることのない必要最低限の大きさとし，大型カバーの重量を低減する。
- 合理的に可能な限り隙間を低減するとともに，換気設備を設けることにより，カバー内の放射性物質の大気への放出を抑制する。



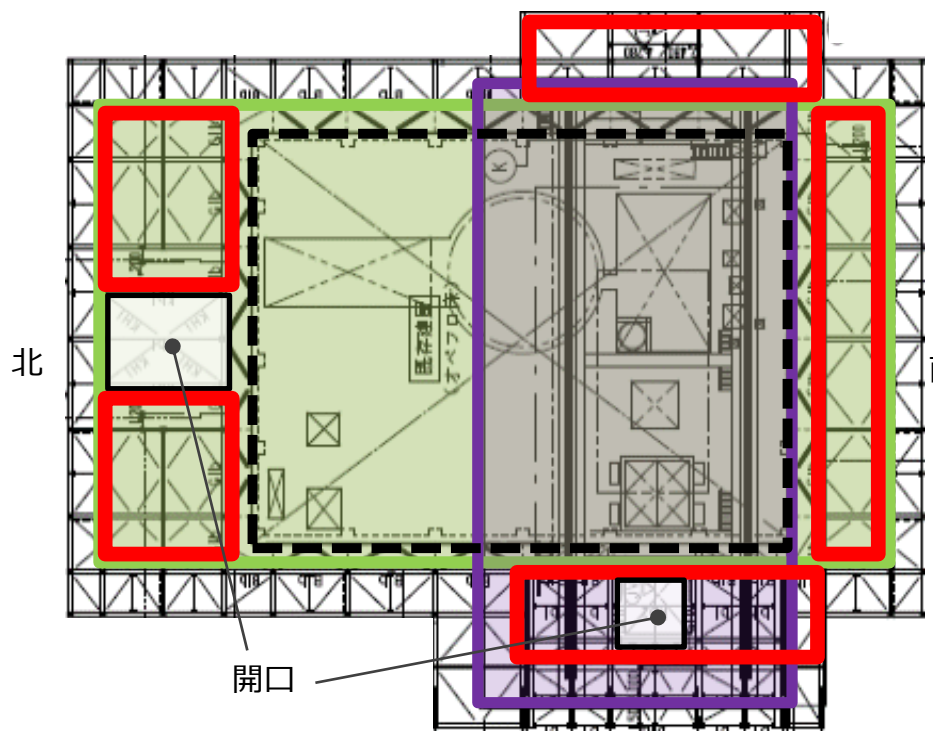
大型カバー平面図 (G.L. +28.3m)



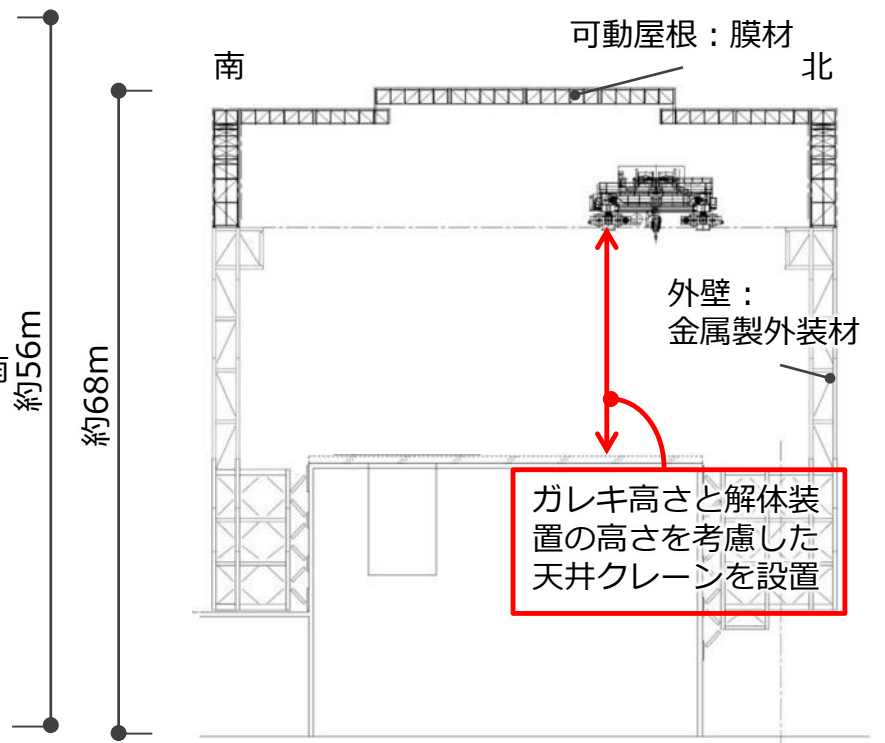
大型カバーA-A断面図

大型カバーの検討結果概要（大きさ）

- ガレキ撤去および燃料取り出し作業が可能な面積，高さを確保する。
- 屋根は軽量化を考慮して膜材を採用，外装材は3号機カバーと同様に金属製外装材を採用する。



大型カバー平面図



大型カバー断面図(南北)

大型カバーの検討結果概要（自然災害に対する設計）

■ 津波

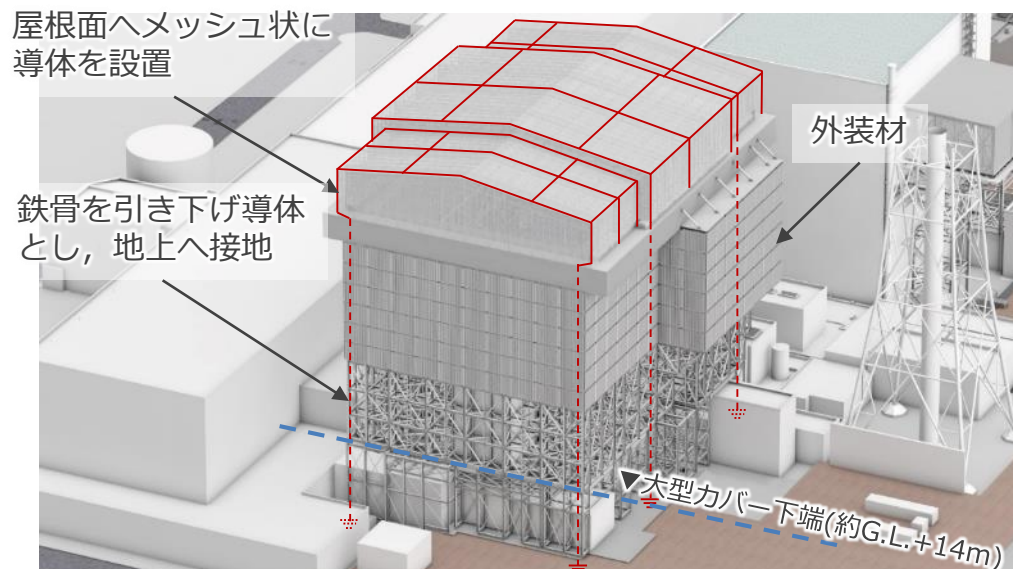
- 東北地方太平洋沖地震津波相当の津波が到達しないと考えられる約G.L.+14m以上に設置する。

■ 豪雨, 台風, 竜巻

- 外装材で覆うことにより風雨を遮る設計としており, 30m/sの風圧力に対して耐えられるよう設計を行っている。

■ 雷

- 雷に対して周囲に保護する避雷設備がないことから, 大型カバーは建築基準法及び日本産業規格に準じた避雷設備を設置する。



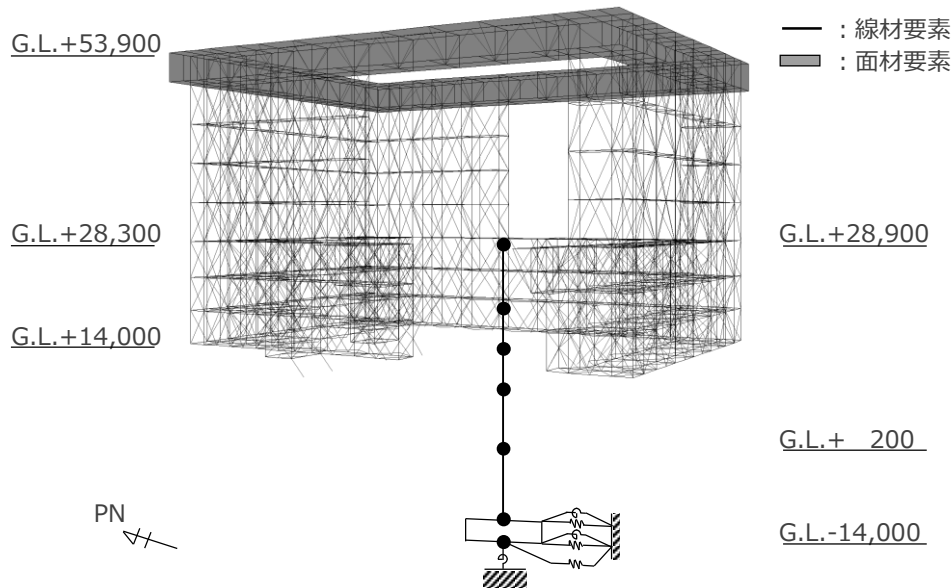
自然災害に対する設計のイメージ

大型カバーの構造強度及び耐震性について

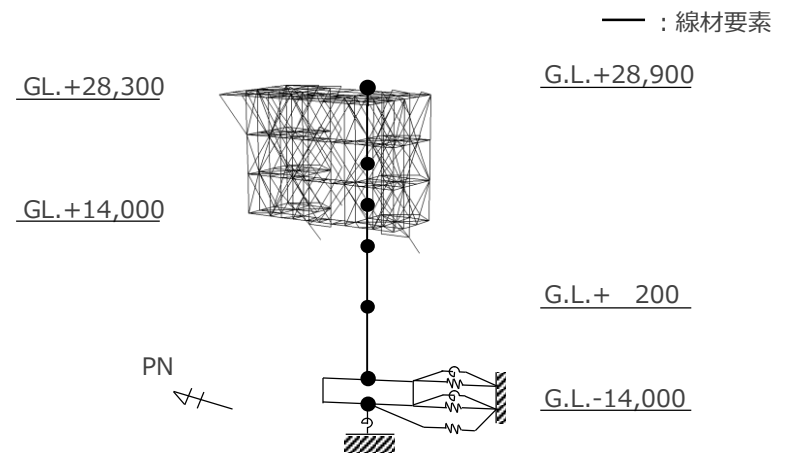
- 大型カバーの評価に当たって、一般部と燃料取扱設備支持部が構造的に分離していることから、モデルを分離して評価する。
- ガレキ撤去時と燃料取り出し時で荷重が異なるため、それぞれ評価する。
- 大型カバー(一般部、燃料取扱設備支持部は別々に)を立体架構モデル、原子炉建屋を質点系モデルとし、それぞれを接続したモデルで基準地震動Ssによる地震応答解析を実施する。



構造強度は問題がなく、また、基準地震動Ssに対しても使用済燃料プールなどへ波及的影響を及ぼさないことを確認済である。



大型カバー一般部の地震応答解析モデル
(単位：mm)



燃料取扱設備支持部の地震応答解析モデル
(単位：mm)

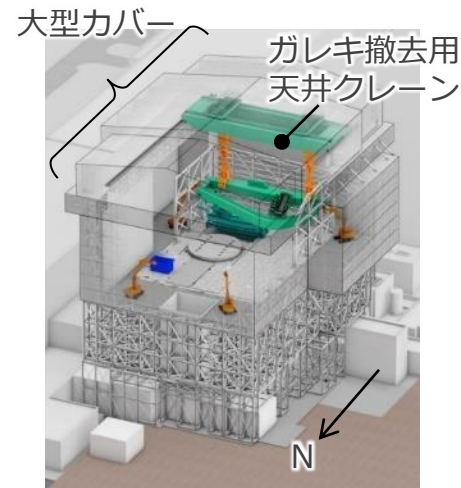
大型カバーに作用する荷重について

大型カバーに作用する荷重は、ガレキ撤去時と燃料取り出し時で異なるため、それぞれのSTEPに考慮する荷重は次の通り。

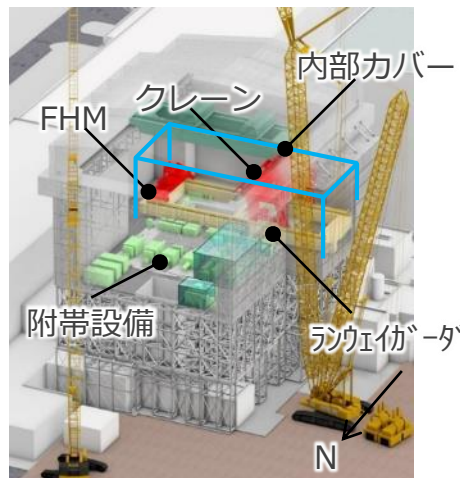
- ガレキ撤去時では、ガレキ撤去用天井クレーン、遠隔解体重機などガレキ撤去に必要な重機、残存しているガレキを荷重として考慮し評価する。
- 燃料取り出し時では、撤去されたガレキを荷重から減らし、その代わりに燃料取扱設備（クレーン、FHMなど）や、遮蔽体などを荷重として考慮し評価する。

主な鉛直荷重

		ガレキ撤去時 (kN)	燃料取り出し時 (kN)
大型カバー側	屋根	3800	3800
	外装材	5800	4360
	遮蔽体	1050	6430
	ガレキ撤去用天井クレーン	4200	4200
	遠隔解体重機	2600	0
	配管荷重	500	830
	小計	17950	19620
原子炉建屋側	残存ガレキ	12130	0
	遮蔽体	0	21110
	機器荷重等	4260	43540
	小計	16390	64650
	参考：原子炉建屋重量	701430	701430



ガレキ撤去時のイメージ



燃料取り出し時のイメージ

大型カバー等の設置による原子炉建屋への影響検討(1)

～滞留水を考慮した地震応答解析モデル～

変更なし

TEPCO

- 地下滞留水を考慮した原子炉建屋モデルにより，基準地震動Ss及び検討用地震動を用いた耐震評価を実施。
- 建屋関係の諸元は，『福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋』における1号機原子炉建屋のものを利用。

1号機原子炉建屋解析モデルの諸元（NS方向）



注 ()内は滞留水による付加分を示す。
[]内はカバリング工事による付加分を示す。

ヤング係数 E_c $2.57 \times 10^7 (\text{kN}/\text{m}^2)$
 せん断弾性係数 G $1.07 \times 10^7 (\text{kN}/\text{m}^2)$
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 41.56m(NS方向) × 43.56m(EW方向)

大型カバー等の設置による原子炉建屋への影響検討(2) ～基準地震動Ss及び検討用地震動による耐震安全性評価～

■ 評価基準値

耐震安全性の評価に当たっては、建物が構造物全体として変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物の終局耐力に対し、妥当な安全余裕を有していることを確認する観点から、原子炉施設の主たる耐震要素である耐震壁の安全性について評価する。

評価は、検討用地震動による各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大せん断ひずみが、評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）を超えないことを確認する。

■ 耐震安全性評価結果

基準地震動に対する耐震壁のせん断ひずみは、地下滞留水のある地下1階について、最大で 0.09×10^{-3} であり、耐震壁の評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）に対して十分余裕がある。また、検討用地震動に対する耐震壁のせん断ひずみは、最大で 0.16×10^{-3} （NS方向、検①）であり、耐震壁の評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）に対して十分余裕がある。

階	G.L. (m)	NS方向($\times 10^{-3}$)				EW方向($\times 10^{-3}$)			
		Ss	検①	検②	評価基準	Ss	検①	検②	評価基準
4F	+21.00~28.90	-	0.05	0.03	4.0以下	-	0.06	0.04	4.0以下
3F	+15.90~+21.00		0.08	0.04			0.07	0.05	
2F	+8.70~+15.90		0.14	0.07			0.13	0.08	
1F	+0.20~+8.70		0.16	0.09			0.12	0.07	
B1F	-1.23~+0.20	0.09	0.12	0.08	0.09	0.12	0.06		

大型カバー等の設置による原子炉建屋への影響検討(3) ～大型カバーの設置を考慮した地震応答解析モデル～

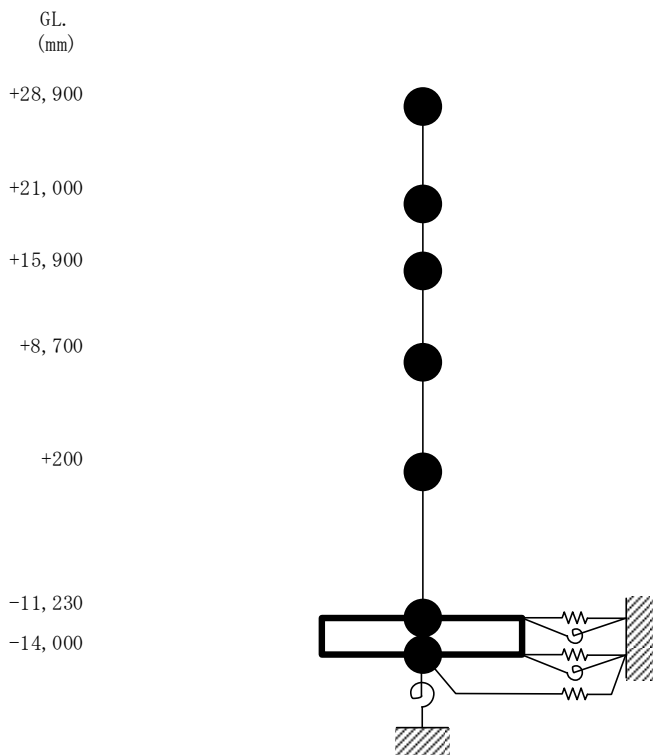
- 大型カバーの設置に伴う原子炉建屋への影響検討を実施するに当たっては、『福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備』の建屋諸元を用いる。

原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
(水平方向, ガレキ撤去時)

G.L.(m)	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 I_G ($\times 10^5$ kN \cdot m 2)	
		水平(NS)方向	水平(EW)方向
+28.90	113830	163.75	93.73
+21.00	81500	117.34	67.09
+15.90	90680	130.48	74.63
+8.70	87510	125.98	125.98
+0.20	162800	234.31	234.31
-11.23	185210	266.64	327.39
-14.00	62400	89.83	110.32
合計	783930		

原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
(水平方向, 燃料取り出し時)

G.L.(m)	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 I_G ($\times 10^5$ kN \cdot m 2)	
		水平(NS)方向	水平(EW)方向
+28.90	161390	232.17	132.90
+21.00	81500	117.34	67.09
+15.90	90670	130.46	74.62
+8.70	88080	126.80	126.80
+0.20	163140	234.80	234.80
-11.23	185210	266.64	327.39
-14.00	62400	89.83	110.32
合計	832390		



1号機原子炉建屋の地震応答解析モデル

大型カバー等の設置による原子炉建屋への影響検討(4)

～基準地震動Ssによる耐震性評価～

変更なし

TEPCO

■ 評価基準値

耐震安全性の評価に当たっては、建物が構造物全体として変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物の終局耐力に対し、妥当な安全余裕を有していることを確認する観点から、原子炉施設の主たる耐震要素である耐震壁の安全性について評価する。

評価は、検討用地震動による各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大せん断ひずみが、評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）を超えないことを確認する。

■ 耐震安全性評価結果

基準地震動に対する耐震壁のせん断ひずみは、地上2階で、最大で 0.18×10^{-3} であり、耐震壁の評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）に対して十分余裕がある。

階	G.L. (m)	N S方向($\times 10^{-3}$)			E W方向($\times 10^{-3}$)		
		基準地震動Ss		評価基準	基準地震動Ss		評価基準
		ガレキ 撤去時	燃料 取出時		ガレキ 撤去時	燃料 取出時	
4F	+21.00~+28.90	0.07	0.10	4.0以下	0.09	0.13	4.0以下
3F	+15.90~+21.00	0.09	0.11		0.09	0.11	
2F	+8.70~+15.90	0.15	0.17		0.15	0.18	
1F	+0.20~+8.70	0.16	0.18		0.12	0.14	
B1F	-1.23~+0.20	0.11	0.12		0.11	0.12	

大型カバー等の設置による原子炉建屋への影響検討(5) ～検討用地震動による原子炉建屋への耐震性影響評価～

変更なし

TEPCO

- 基準地震動Ssを用いた滞留水を考慮した地震応答解析では、地下1階のせん断ひずみは最大 0.09×10^{-3} であり、また、検討用地震動を入力地震動とした場合には、最大 0.12×10^{-3} であった。
- 以上より、地震動が基準地震動Ssから検討用地震動に変更となると、ひずみは約1.3～1.4倍程度増大すると想定される。
- 一方で、大型カバーを設置した場合における基準地震動Ssによる原子炉建屋の耐震壁の最大せん断ひずみは、 0.18×10^{-3} である。
- 基準地震動から検討用地震動に変更となった際のせん断ひずみの増加比率に余裕を加えて、2倍程度に増大するとしたとしても、大型カバーを設置した場合の原子炉建屋の耐震壁のせん断ひずみは最大で 0.4×10^{-3} 程度になると想定され、評価基準値 4.0×10^{-3} を下回る。このため、大型カバーを設置したとしても原子炉建屋の耐震性に大きな影響を与えないと判断している。

3, 4号機燃料取り出し用カバーとの比較

■ 3, 4号機との主要な比較項目を以下に示す。

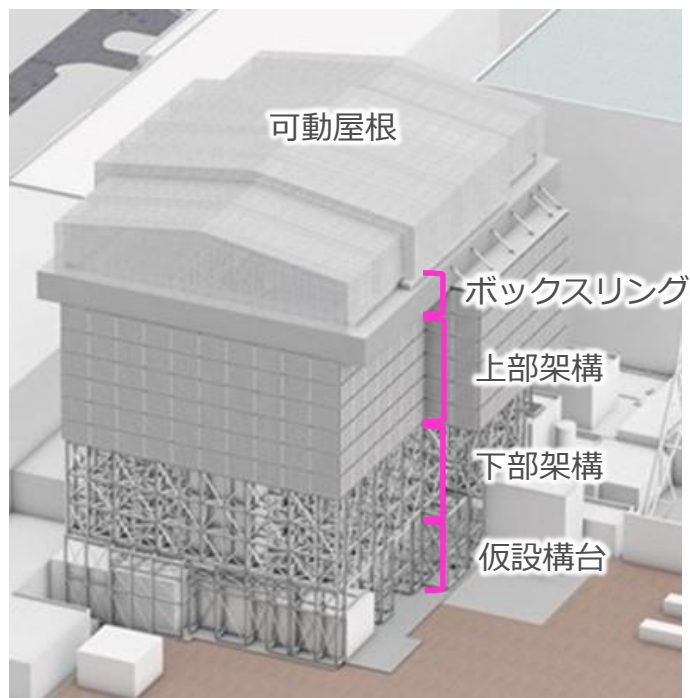
号機	1号機	3号機	4号機
イメージ図			
構造	鉄骨造, トラス構造	鉄骨造, トラス構造	鉄骨造, ラーメン構造
カバーの支持	原子炉建屋外壁に支持	原子炉建屋1階, 3階及び5階に支持	地盤, 原子炉建屋外壁及びシェル壁に支持
屋根	可動式	可動しない	可動しない
外装材	屋根: 膜材 外壁: 金属製外装材	金属製外装材	金属製外装材
カバーに支持する主要設備	ガレキ撤去用天井クレーン (一般部に設置) 燃料取扱機, クレーン (原子炉建屋及び燃料取扱設備支持部に設置)	燃料取扱機, クレーン	燃料取扱機, クレーン

- 現地では、先行して鉄骨の発注及び製作、構外ヤードでの鉄骨部材の地組などを実施している。
- 今後、原子炉建屋に取り付くためのアンカー打設を実施する。

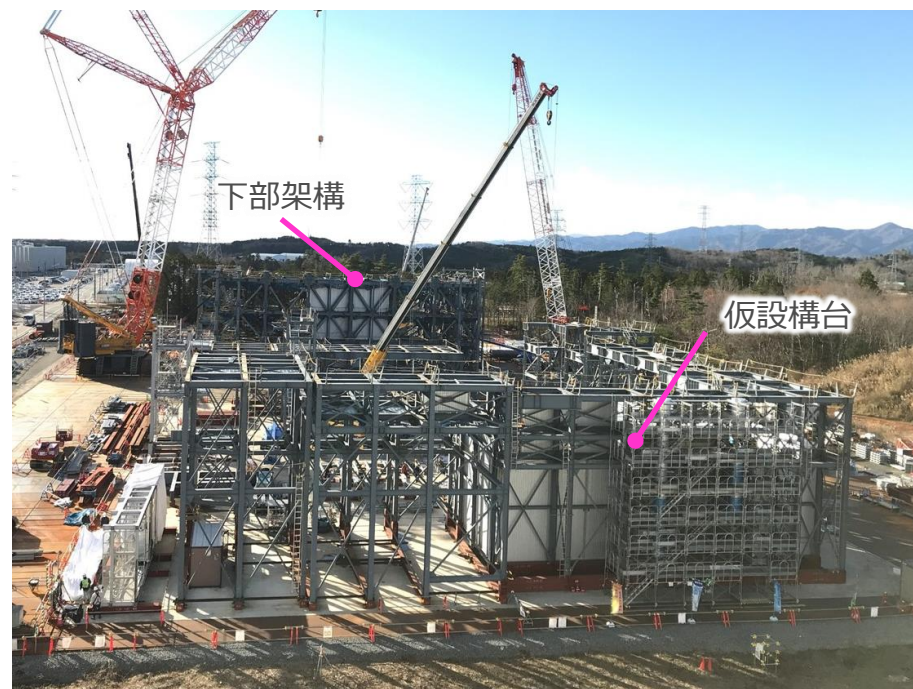
	2021年度												2022年度	2023年度	2024年度				
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3							
中長期RM マイルストーン																2023年度頃 大型カバー設置完了			
実施計画				実施計画変更申請 (大型カバー)															
						実施計画変更申請 (大型カバー換気設備他)													
大型カバー設置														本体鉄骨建方等					
														R/B外壁調査, アンカー設置, ベースプレート設置					
														仮設構台等設置					
														作業ヤード整備, 構外ヤード地組, 運搬等					
大型カバー換気設備他 設置														換気設備ダクト仮組み, 注水用配管仮組み【構外作業】					
														大型カバー換気設備他設置【構内作業】					

現場状況

- 2021年4月下旬より大型カバー設置へ向けた、仮設構台の地組などを構外ヤードで実施中。
- 以下フローの通り順次地組を行う。



大型カバー全体の概要図



構外ヤード全景（2021年12月13日時点）

措置を講ずべき事項への適合性

- 1号機大型カバー設置に係る実施計画変更認可申請について「特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について（以下、措置を講ずべき事項）」のうち、関連する下記事項に適合する記載箇所及び内容を説明する。

Ⅱ．設計，設備について措置を講ずべき事項

- 11. 放射性物質の放出抑制等による敷地周辺の放射線防護等
- 12. 作業者の被ばく線量の管理等
- 14. 設計上の考慮
 - ① 準拠規格及び基準
 - ② 自然現象に対する設計上の考慮
 - ④ 火災に対する設計上の考慮
 - ⑤ 環境条件に対する設計上の考慮

1 1. 放射性物質の放出抑制等による敷地周辺の放射線防護等

- 措置を講ずべき事項「1 1. 放射性物質の放出抑制等による敷地周辺の放射線防護等」では、以下を求めている。

- 特定原子力施設から大気、海等の環境中へ放出される放射性物質の適切な抑制対策を実施することにより、敷地周辺の線量を達成できる限り低減すること。
- 特に施設内に保管されている発災以降発生した瓦礫や汚染水等による敷地境界における実効線量（施設全体からの放射性物質の追加的放出を含む実効線量の評価値）を、平成25年3月までに1mSv/年未満とすること。

- 変更認可申請では、敷地周辺の放射線防護について以下に記載している。

	実施計画Ⅱ記載箇所	記載内容
本文	2 特定原子力施設の構造及び設備、工事の計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備 2.11.1.3 設計方針 (3)燃料取り出し用カバー b.放射性物質の飛散・拡散防止	既認可の記載を適用

1 2. 作業者の被ばく線量の管理等

- 措置を講ずべき事項「1 2. 作業者の被ばく線量の管理等」では、以下を求めている。

現存被ばく状況での放射線業務従事者の作業性等を考慮して、遮へい、機器の配置、遠隔操作、放射性物質の漏えい防止、換気、除染等、所要の放射線防護上の措置及び作業時における放射線被ばく管理措置を講じることにより、放射線業務従事者が立ち入る場所の線量及び作業に伴う被ばく線量を、達成できる限り低減すること。

- 変更認可申請では、作業者の被ばく線量の管理について以下に記載している。

	実施計画Ⅱ記載箇所	記載内容
本文	2 特定原子力施設の構造及び設備、工事の計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備 2.11.1.6 自然災害対策等 (6) 被ばく低減対策	既認可の記載を適用

1 4. 設計上の考慮 ①準拠規格及び基準

- 措置を講ずべき事項「① 準拠規格及び基準」では、以下を求めている。

安全機能を有する構築物，系統及び機器は，設計，材料の選定，製作及び検査について，それらが果たすべき安全機能の重要度を考慮して適切と認められる規格及び基準によるものであること。

- 変更認可申請では，準拠規格及び基準について以下に記載している。

	実施計画Ⅱ記載箇所	記載内容
本文	2 特定原子力施設の構造及び設備，工事の計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備 2.11.1.8 構造強度及び耐震性 c. 燃料取り出し用カバー	既認可の記載を適用
添付	2.11 添付資料-4-2 燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書 5. 1号機燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性について	大型カバーの準拠規格及び基準 建築基準法，日本建築学会， 日本電気協会等の規基準類に準拠 していることを記載

1 4. 設計上の考慮 ②自然現象に対する設計上の考慮

■ 措置を講ずべき事項「② 自然現象に対する設計上の考慮」では、以下を求めている。

- 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計上の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること。
- 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、地震以外の想定される自然現象（津波、豪雨、台風、竜巻等）によって施設の安全性が損なわれない設計であること。重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、予想される自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。

■ 変更認可申請では、自然現象に対する設計上の考慮について以下に記載している。

	実施計画Ⅱ記載箇所	記載内容
本文	2 特定原子力施設の構造及び設備、工事の計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備 2.11.1.6 自然災害対策等 (1) 津波 (2) 豪雨、台風、竜巻	既認可の記載を適用
添付	2.11 添付資料-4-2 燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書 5. 1号機燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性について	大型カバーの構造強度評価 建築基準法及び関係法令に基づいた 風圧力に対する設計結果を記載

1 4. 設計上の考慮 ④ 火災に対する設計上の考慮

- 措置を講ずべき事項「④ 火災に対する設計上の考慮」では、以下を求めている。

火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の方策を適切に組み合わせて、火災により施設の安全性を損なうことのない設計であること。

- 変更認可申請では、火災に対する設計上の考慮について、以下に記載している。

	実施計画Ⅱ記載箇所	記載内容
本文	2 特定原子力施設の構造及び設備，工事の計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備 2.11.1.6 自然災害対策等 (4) 火災	既認可の記載を適用

1 4. 設計上の考慮 ⑤ 環境条件に対する設計上の考慮

- 措置を講ずべき事項「⑤ 環境条件に対する設計上の考慮」では、以下を求めている。

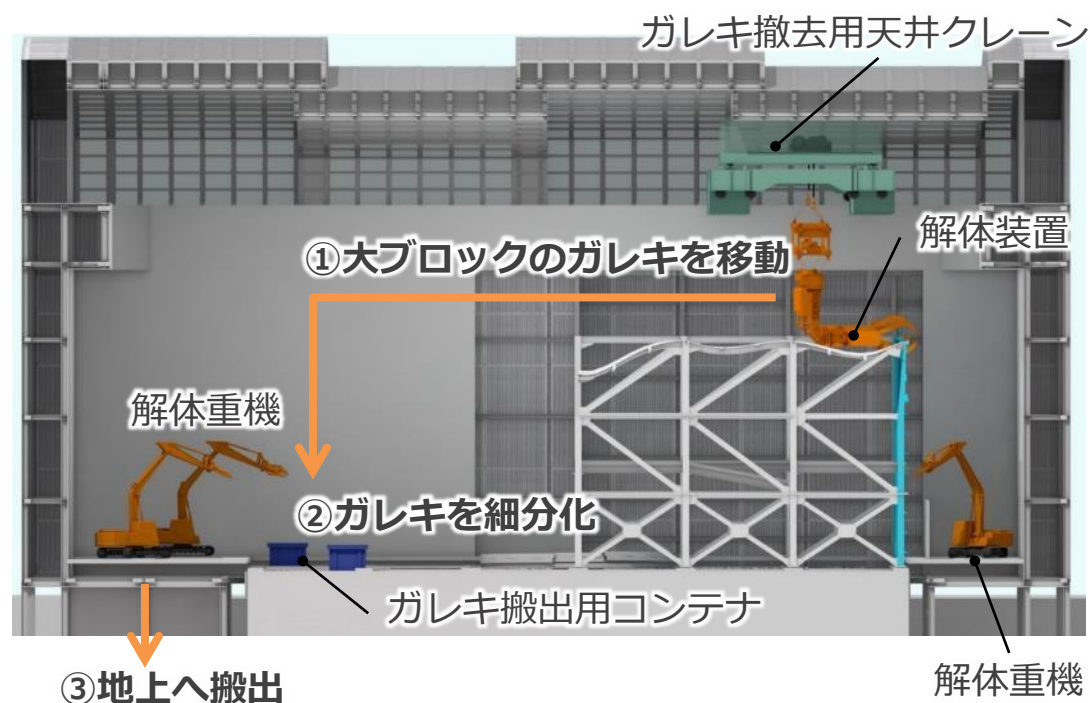
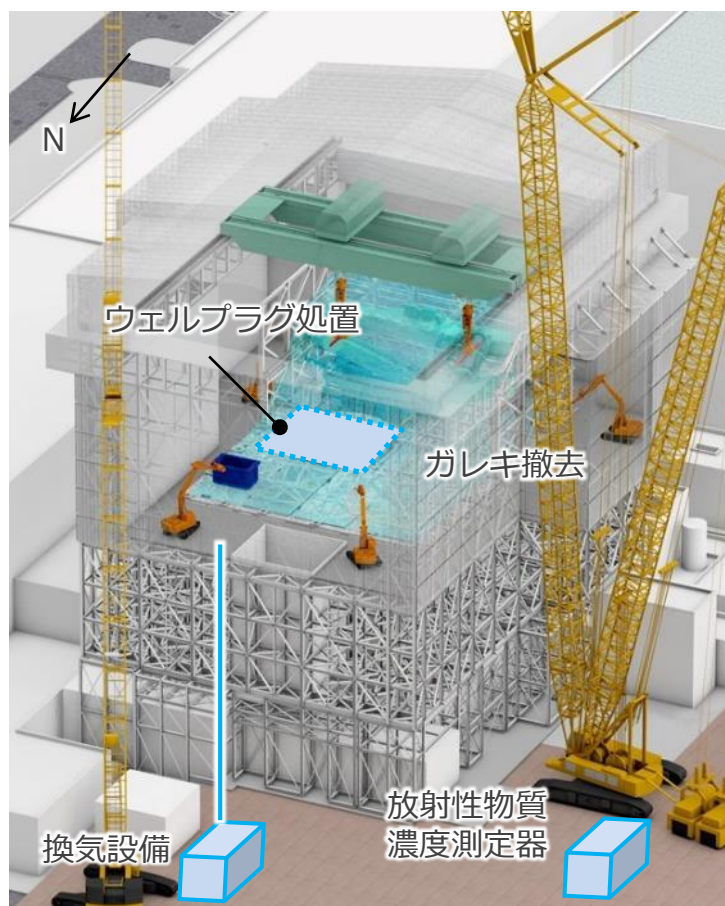
安全機能を有する構築物、系統及び機器は、経年事象を含むすべての環境条件に適合できる設計であること。特に、事故や地震等により被災した構造物の健全性評価を十分に考慮した対策を講じること。

- 変更認可申請では、環境条件に対する設計上の考慮について以下に記載している。

	実施計画Ⅱ記載箇所	記載内容
本文	2 特定原子力施設の構造及び設備，工事の計画 2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備 2.11.1.6 自然災害対策等 (5) 環境条件	既認可の記載を適用
添付	2.11 添付資料-4-2 燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書 5.3.5 原子炉建屋の耐震性に対する検討	原子炉建屋の健全性 燃料取り出し用カバーの設置を考慮しても耐震性に影響がないことを確認

【参考】ガレキ撤去方法について

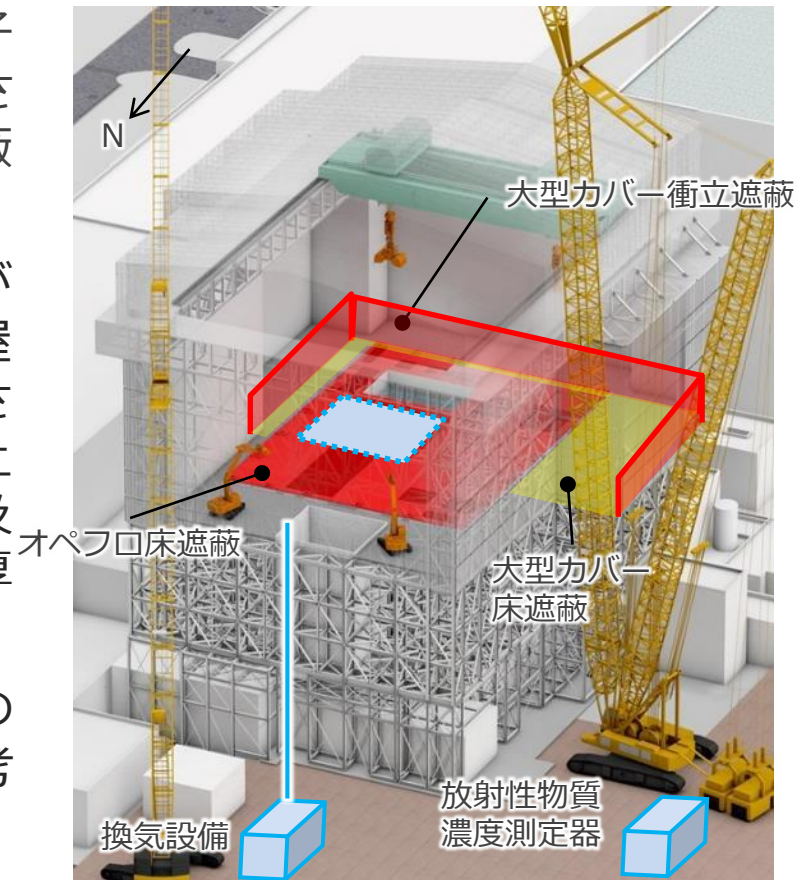
- ガレキ撤去は、大型カバー内でガレキ撤去用天井クレーンや解体重機により実施する。
- ガレキ撤去時に発生するダストは換気設備のフィルタで捕集して排出するとともに、放射性物質濃度測定器により監視する。



※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

【参考】除染・遮蔽について

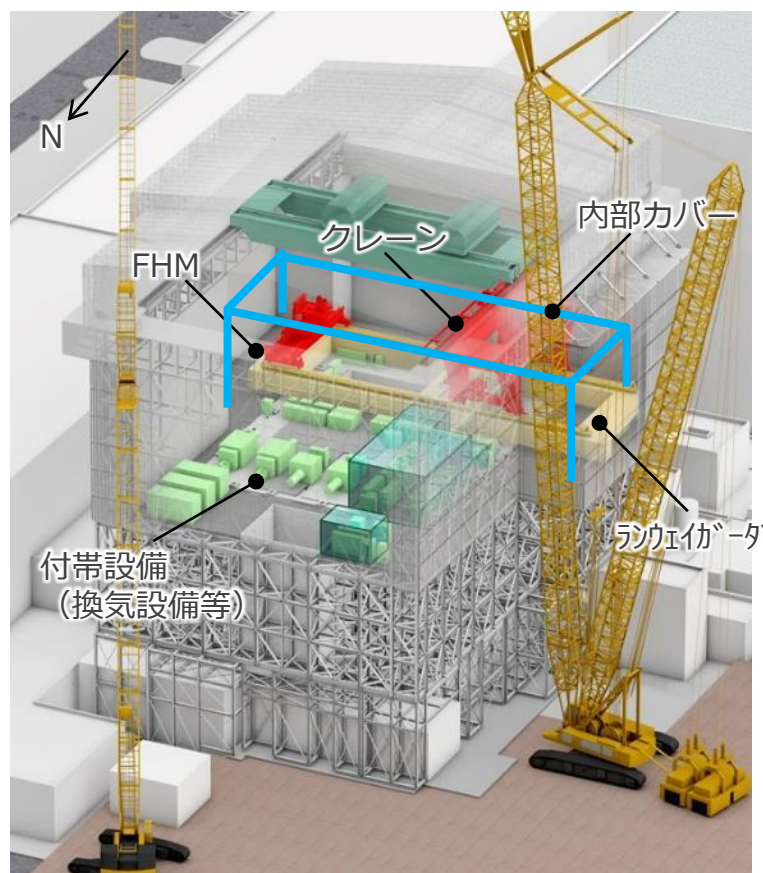
- 燃料取り出し作業を有人で行うため、原子炉からの放射線などによる被ばくを低減させる必要があり、オペフロの除染及び遮蔽を設置する。
- 遮蔽については、オペフロ上の線量が $50\mu\text{Sv/h}$ （目標）になるよう、原子炉建屋オペフロ床に床遮蔽（コンクリート厚さ800mm相当）、大型カバーオペフロより上に衝立遮蔽（鋼板厚さ30~50mm相当）、及び大型カバー床に床遮蔽（コンクリート厚さ260mm相当）を設置する。
- 上記の計画を基に、重量等を大型カバーの燃料取り出し時の地震応答解析モデルに考慮して設計を行っている。



※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

【参考】燃料取り出し方法について

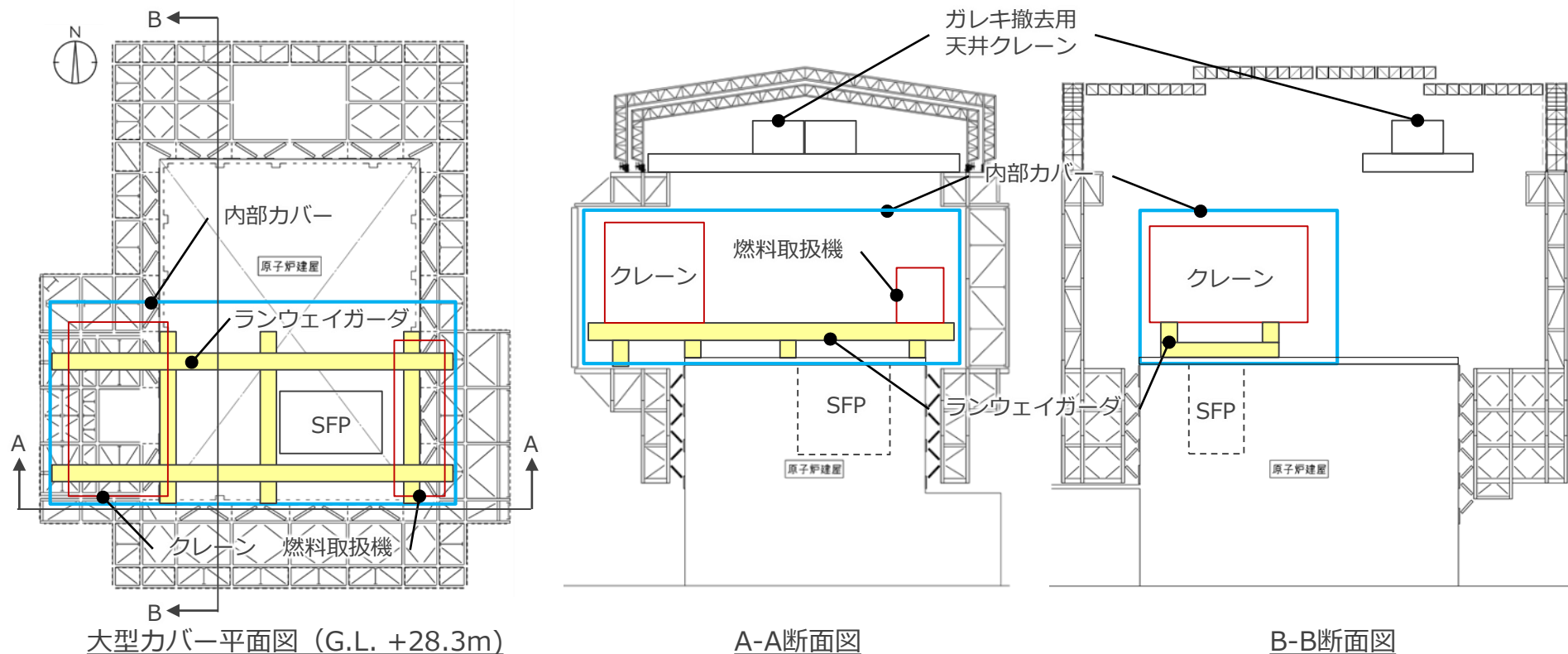
- 燃料取り出しにあたっては、大型カバー内に燃料取扱設備や付帯設備、内部カバー、ランウェイガーダを設置する。
- 燃料取扱設備は内部カバー内に、付帯設備は内部カバー外に設置する。
- 燃料取り出しは内部カバー内で有人作業で実施する。



※イメージ図につき実際と異なる部分がある場合がある

【参考】内部カバーについて

- 大型カバーは、合理的な範囲で隙間を低減するものの、塩分を含む外気や微量な雨水の流入が想定される。
- 燃料取扱設備は屋内仕様であるため、屋内環境を構築するために大型カバー内に内部カバーを設置する。
- 内部カバーは、燃料取扱設備や使用済燃料プールを覆う範囲に設置し、燃料取扱設備や大型カバーに干渉しない大きさとして設計する。



添付資料

■ 補足説明資料

- 添付資料1 大型カバー 補足説明資料
- 添付資料2 1号機大型カバーに対する1/2Ss450評価について
- 添付資料3 1号機大型カバーのSs900による
評価方針と耐震クラス設定について
- 添付資料4 アンカー削孔欠損を考慮したR/B外壁部の評価について
- 添付資料5 Ss900による大型カバーの評価について

1号機大型カバーのSs900による 評価方針と耐震クラス設定について

2022年4月7日

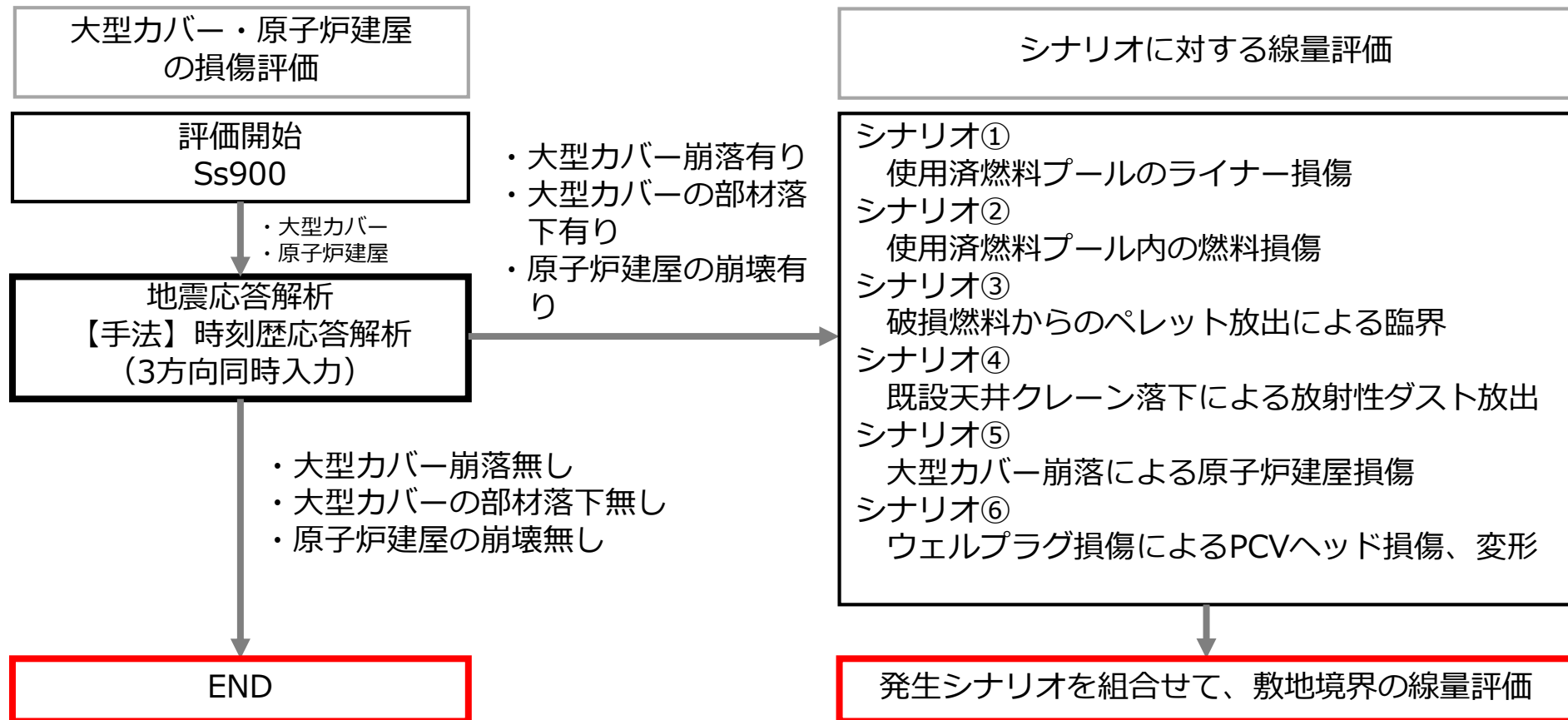
TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

評価方針

- Ss900に対して、大型カバーと原子炉建屋の一体解析モデルを用いた地震応答解析を実施し、大型カバーが「崩落するか」「大型カバーの部材が落下するか」等を評価した上で、R/B, SFP, ウェルプラグ・PCVヘッド等への波及的影響に起因する公衆被ばくのシナリオを評価する。

評価フロー



許容限界設定の考え方

- Ss900による評価を行う上での許容限界の設定にあたり、地震による大型カバーの崩落・落下によって、公衆への放射線影響を及ぼすものを防護対象として以下設備、施設を抽出した。
 - ① 使用済み燃料プール（ライナー含む）
 - ② 使用済み燃料貯蔵ラック
 - ③ 使用済み燃料
 - ④ ガレキ（既設天井クレーン等）
 - ⑤ ウェルプラグ・PCVヘッド
 - ⑥ 原子炉建屋
- これら防護対象施設・設備に対し、新設する大型カバー及びガレキ撤去用天井クレーンが与える波及的影響の想定事象として、全体崩落と部材落下を発生させる事象を抽出した。

許容限界設定の考え方

■ 各部位に対する評価の考え方と許容限界を整理した結果を以下に示す。

許容限界と考え方(1/2)

部位	事象	想定される事象	評価方針	許容限界	
大型力バー	架構	全体崩落	・ 架構全体が許容限界を超えて傾き、防護対象施設・設備へ落下する	・ 最大層間変形角が波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認する	層間変形角 1/30 ^{※1}
		全体崩落	・ 架構を支持するアンカーボルトが抜け、架構全体が防護対象施設・設備へ崩落する	・ 引張とせん断の二乗累加則により検定し許容限界に至らないことを確認する	終局強度に対する検定比 1.0
		部材落下	・ 許容限界を超える応力により、部材が破断し、防護対象施設・設備へ落下する	・ 部材に生じる応力が許容限界を超えないことを確認、超える場合はエネルギー一定則による評価を実施し、塑性率の許容限界を超えないことを確認する	弾性限界強度または塑性率 5.0 ^{※2}
	屋根	全体崩落	・ 屋根全体が回転や滑動することで、大型力バー架構から防護対象施設・設備へ落下する	・ 逸走防止受けにより落下を防止する構造であることを確認する	—
		全体崩落	・ 許容限界を超える応力により、部材が破断し、防護対象施設・設備へ落下する	・ 部材に生じる塑性率が許容限界を超えないことを確認、超える場合は応答による繰返し回数が許容限界に対して十分な裕度を有することを確認する	塑性率5.0または評価最大ひずみ度に対する破断寿命 1.0
		部材落下	・ 許容限界を超える応力により、部材が破断し、防護対象施設・設備へ落下する	・ 部材に生じる塑性率が許容限界を超えないことを確認、超える場合はエネルギー一定則による評価を実施し、塑性率の許容限界を超えないことを確認する	弾性限界強度または塑性率 5.0 ^{※2}

※1:「震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（（財）日本建築防災協会）」を参考に許容限界を設定している。
 なお、被災度区分判定基準においては、柱の残留傾斜角が1/30を超えた場合に大破と判定しているが、保守的に最大層間変形角を用いて評価を行う。

※2:JSCA 性能メニュー（社団法人日本建築構造技術者協会、2002年）を参考に定めたクライテリア*

*:北村他:「性能設計における耐震性能判断基準値に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp183-191, 2006.6

許容限界と考え方(2/2)

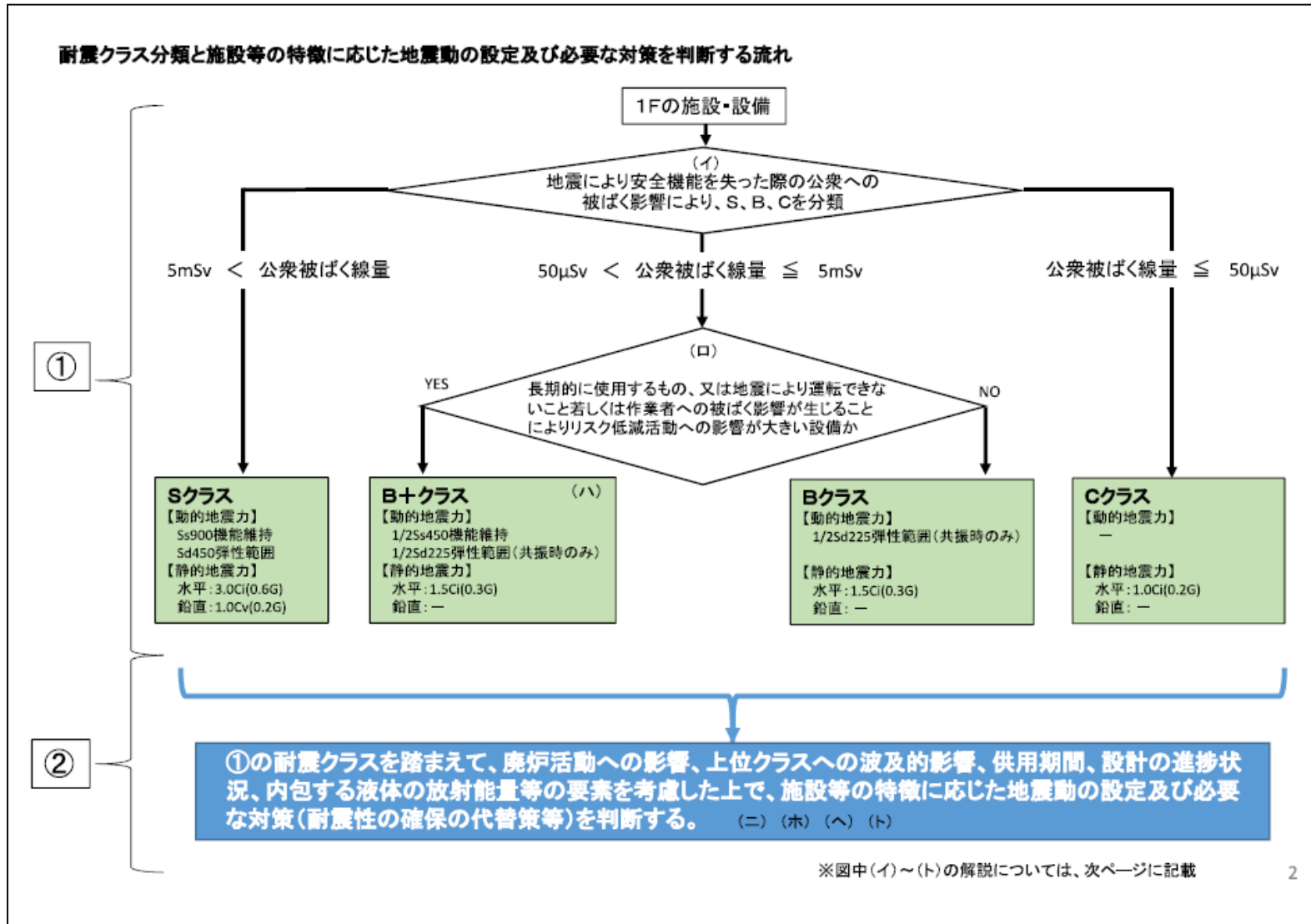
部位	事象	想定される事象	評価方針	許容限界	
ガレキ撤去用 天井クレーン	全体崩落	・ ガーダが回転や滑動することで、 大型カバー架構から脱輪し、防護対 象施設・設備へ落下する	・ ガーダが回転してもガーダと架構 が接触し物理的に落下しないことを 確認する	—	
			・ 東西レール間の最大相対水平変位 がクレーンの水平かかり代に比べ小 さいことを確認する	東西レール間 相対変位 2.3m	
	部材落下	・ トロリが回転や滑動することで、 ガーダから脱輪し、防護施設・設備 へ落下する	・ 許容限界を超える応力により、 ガーダが破断し、防護対象施設・設 備へ落下する	・ クレーンガーダの最大応答値が全 塑性モーメントを超える不安定状態 に至らないことを確認する	全塑性モーメント Mp
			・ トロリの水平力による脱落防止材 の発生応力が弾性限界強度を超えな いことを確認する	弾性限界せん断強度 149N/mm ² (SS400)	
			・ クレーンガーダの最大応答変位が トロリ脱落防止材の鉛直かかり代に 比べ小さいことを確認	鉛直変位 259mm	
原子炉建屋	全体崩落	・ 大型カバーを付加したことにより、 原子炉建屋が層崩壊する	・ 耐震壁のせん断ひずみを評価し、 崩壊に至るか確認する	せん断ひずみ 4.0×10 ⁻³	

- 『添付資料5 Ss900による大型カバーの評価について』の結果、以下を確認した。

Ss900により、

- ・大型カバー崩落無し
- ・大型カバーの部材落下無し
- ・原子炉建屋の崩壊無し

以上より、R/B, SFP, ウェルプラグ・PCVヘッド等への波及的影響は無い（シナリオ①～⑥は発生しない）ことから、大型カバーの耐震クラスはB+クラスとして、計画を進める。



Ss900による大型カバーの 評価について

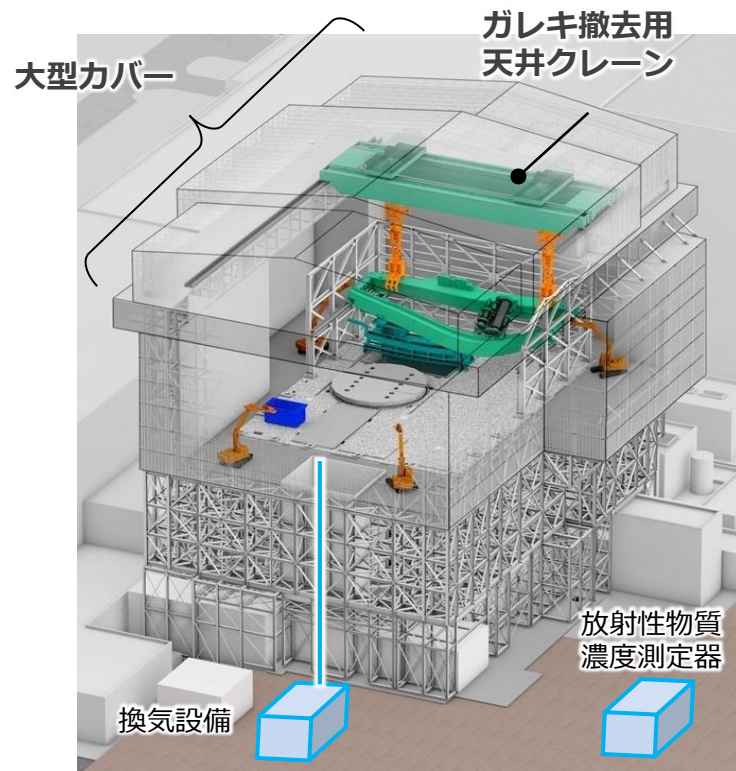
2022年4月7日（第12回）

TEPCO

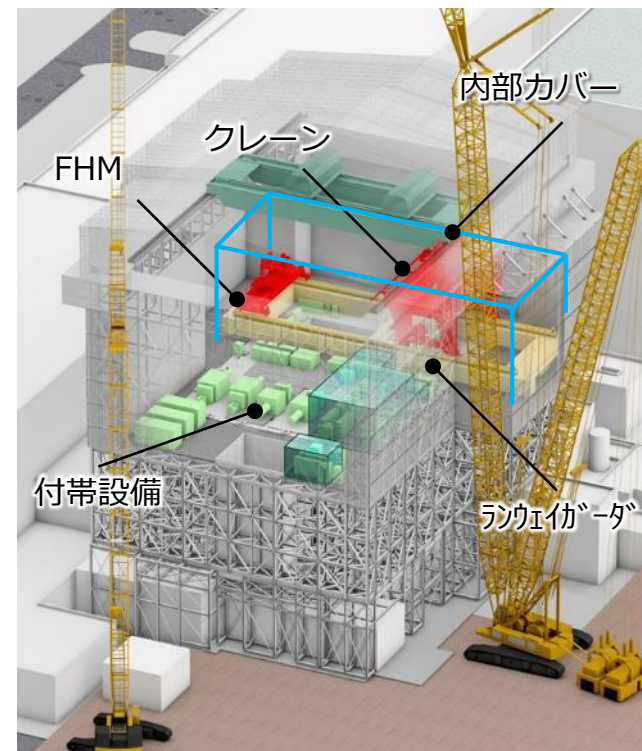
東京電力ホールディングス株式会社

はじめに

- 本資料は、大型カバーについて、検討用地震動（Ss900Gal）（以下、「Ss900」という）に対する原子炉建屋や使用済燃料プール等への波及的影響検討結果を説明するものである。



ガレキ撤去時

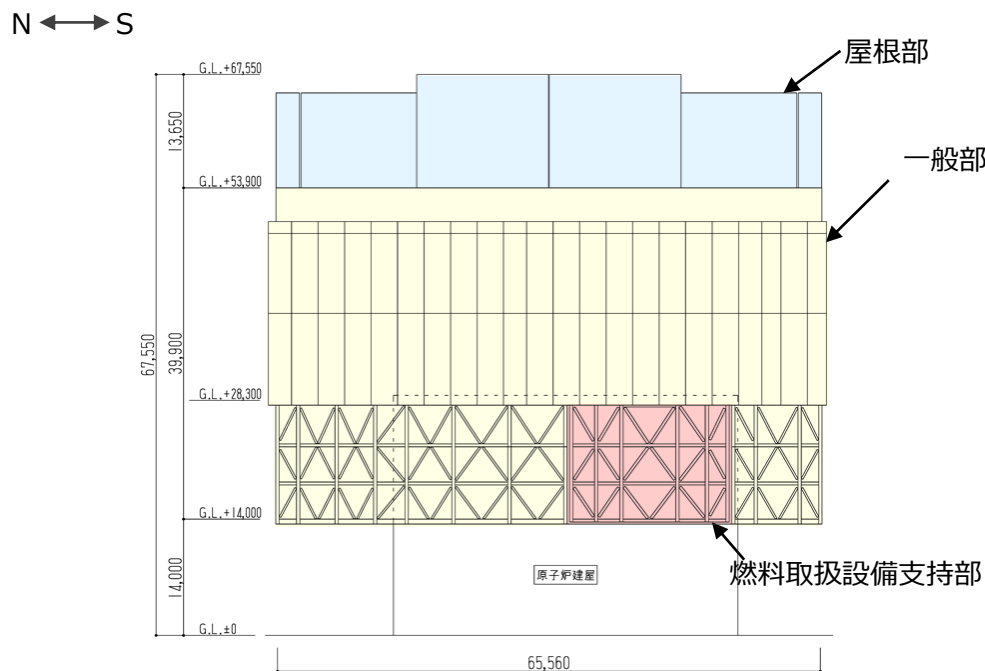


燃料取り出し時

大型カバー概念図（鳥瞰図）

大型カバーの概要

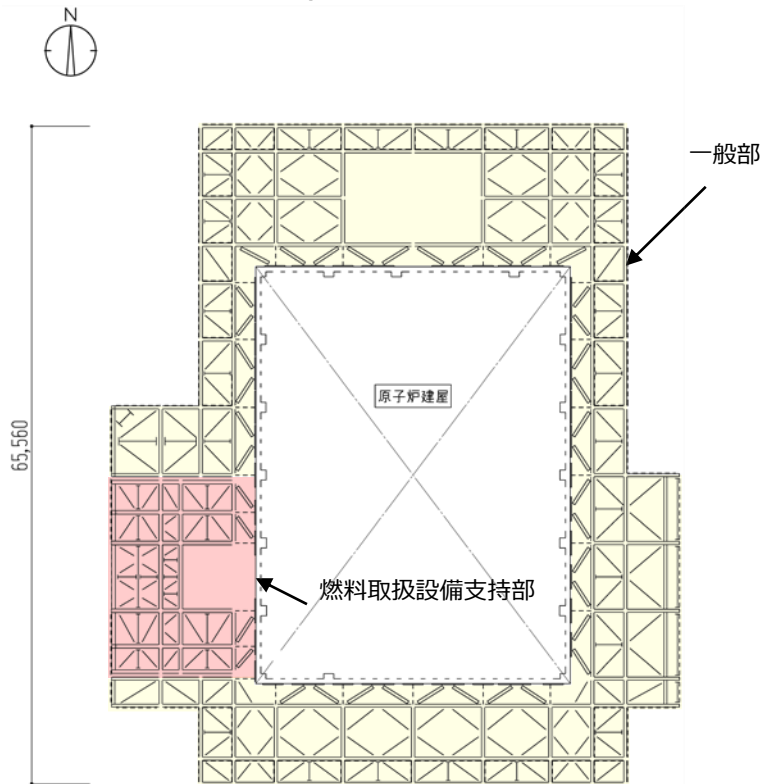
- 大型カバーは、原子炉建屋オペレーティングフロア（以下、「オペフロ」という）を覆う構造としており、屋根部、一般部及び燃料取扱設備支持部から構成され、オペフロ上にあるガレキを撤去するガレキ撤去用天井クレーンを有する。また、大型カバーの燃料取扱設備支持部は燃料取扱設備（燃料取扱機及びクレーン）を支持する。



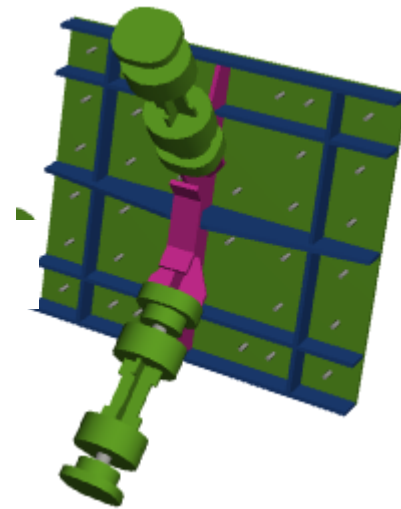
大型カバーのイメージ（単位：mm）

大型カバーの概要

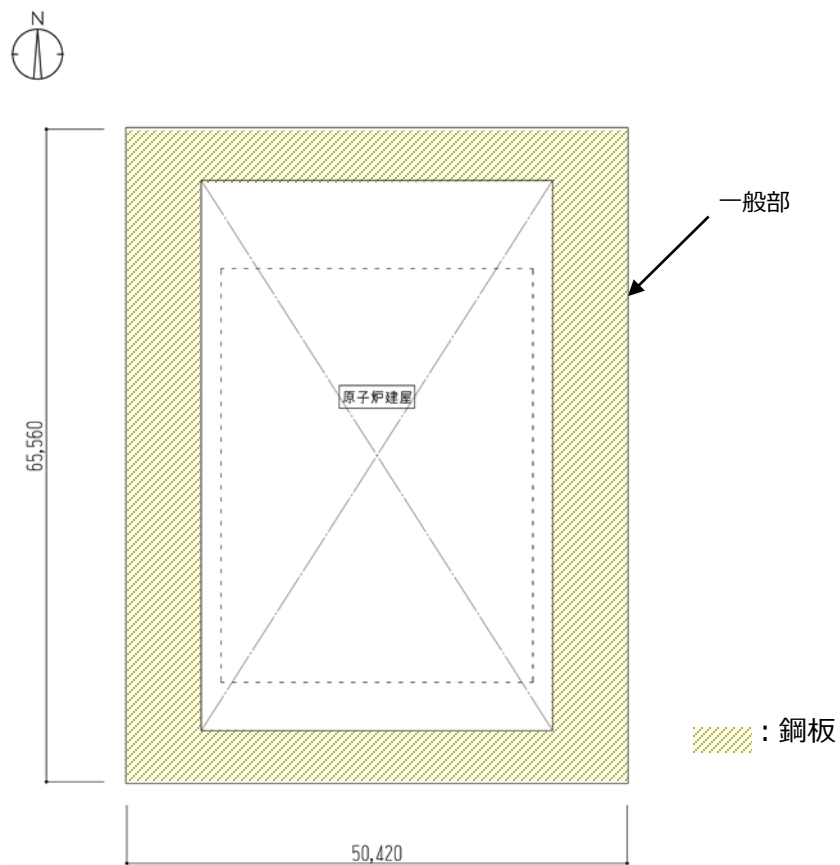
- 大型カバーは、東西方向55.92m、南北方向65.56m、高さ67.55mの構造物で、構造形式はトラス構造、構造種別は鉄骨造である。また、一般部と燃料取扱設備支持部は構造的に分離している。大型カバー頂部付近は、水平剛性を高めるため、鋼板による箱桁架構とし、屋根は可動式としている。
- 大型カバーは、原子炉建屋に支持される構造物である。原子炉建屋との取り合い部においては、アンカーボルトにより接続している。



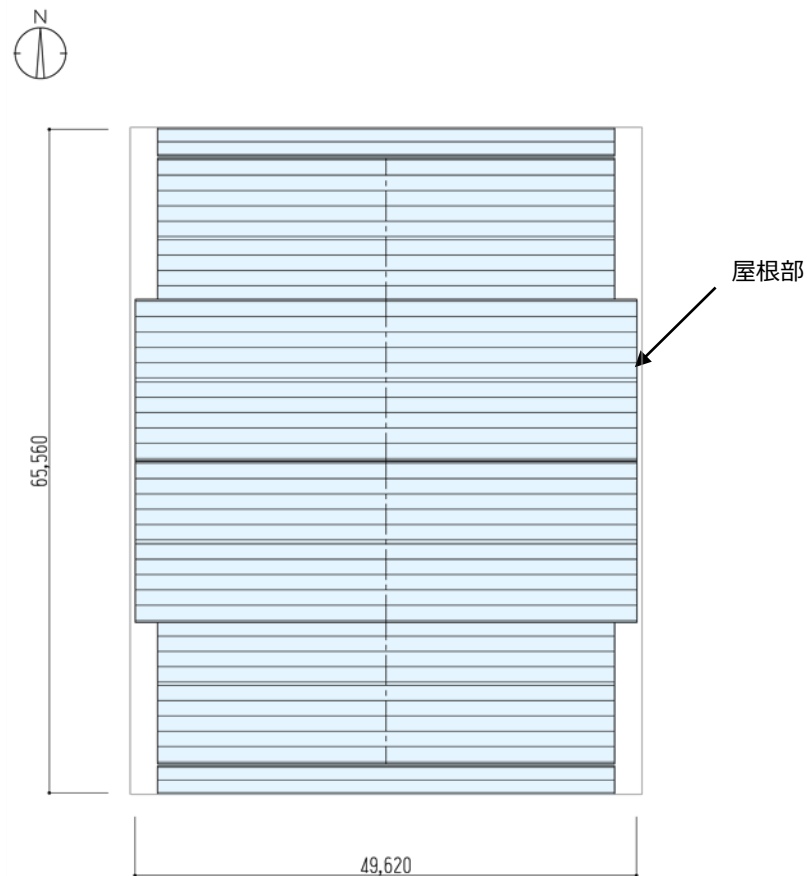
伏図 (G.L.+28,300)



建屋接続部の立体モデル



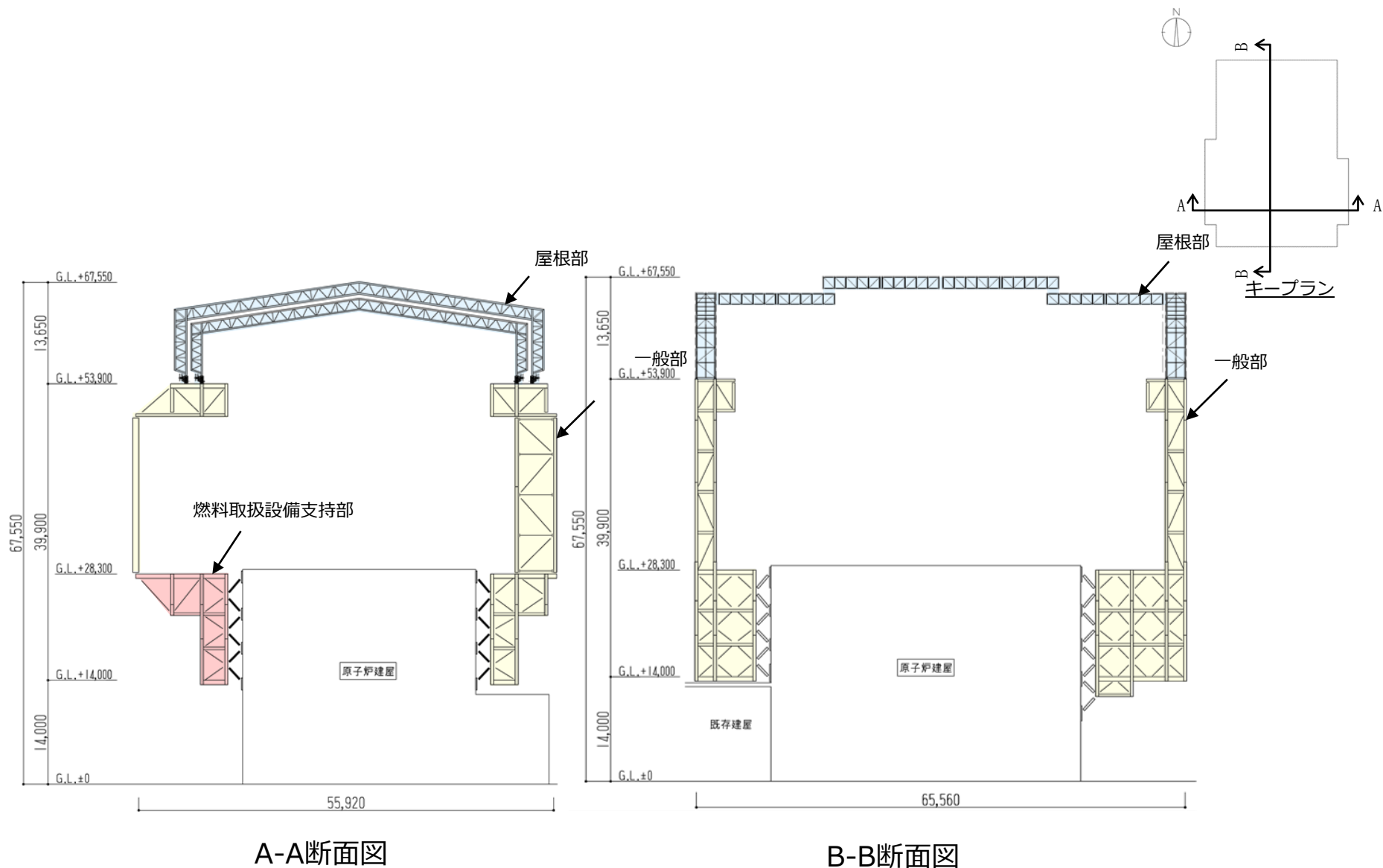
伏図 (G.L.+53,900)



屋根伏図

大型カバーの概要 (単位 : mm)

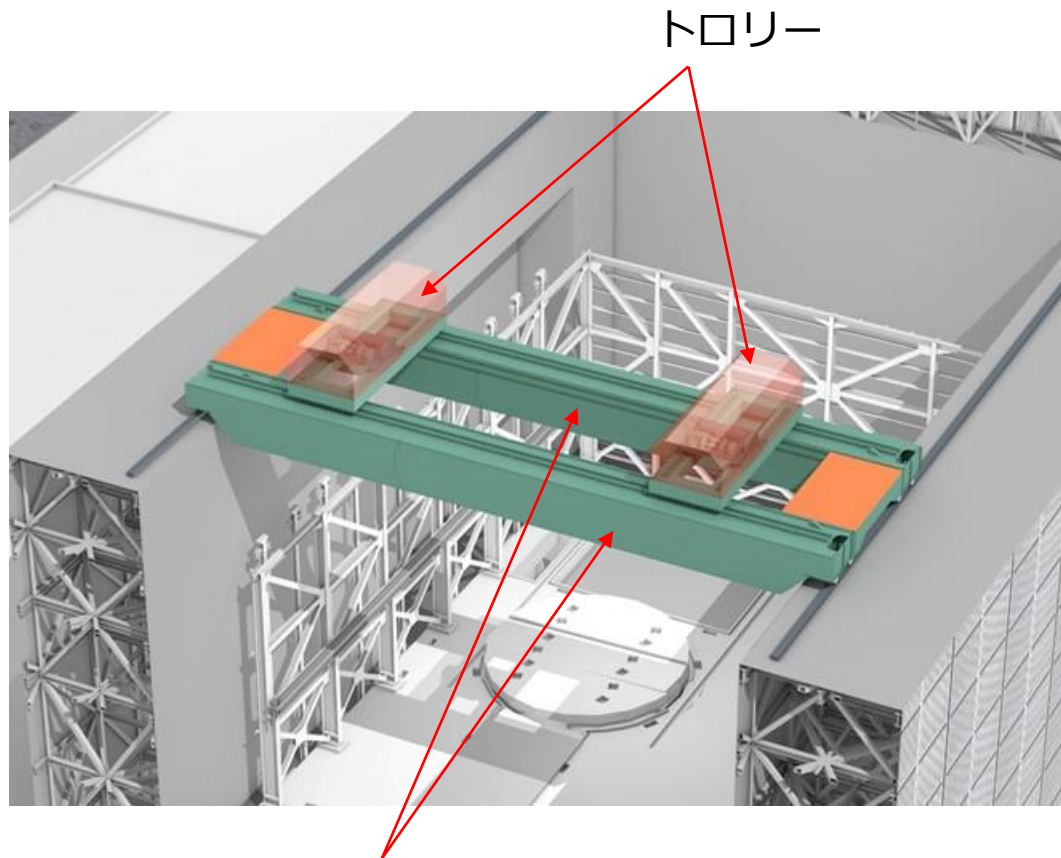
大型カバーの概要



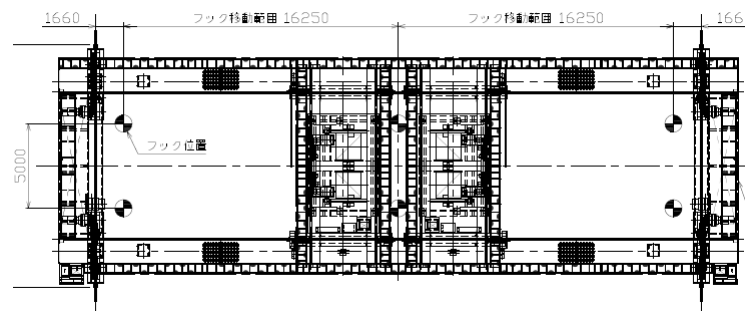
大型カバーの概要 (単位：mm)

大型カバーの概要（ガレキ撤去用天井クレーン）

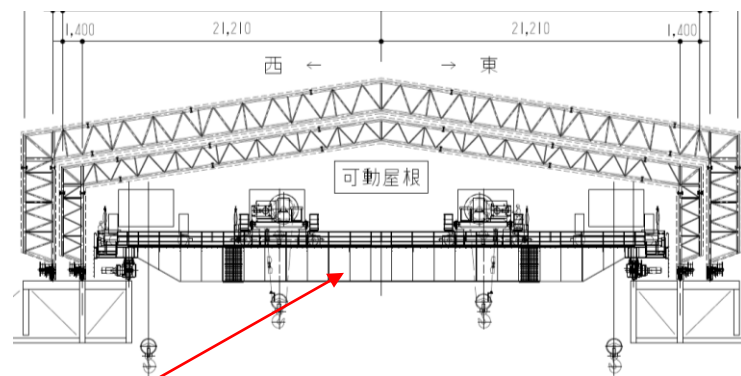
- ガレキ撤去用天井クレーンは大型カバー頂部に設置され、クレーンガーダ2本の上をトロリーが移動する。



クレーンガーダ



平面図



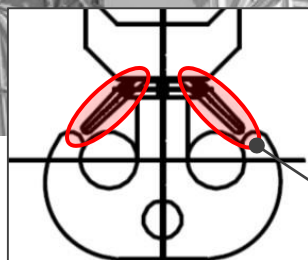
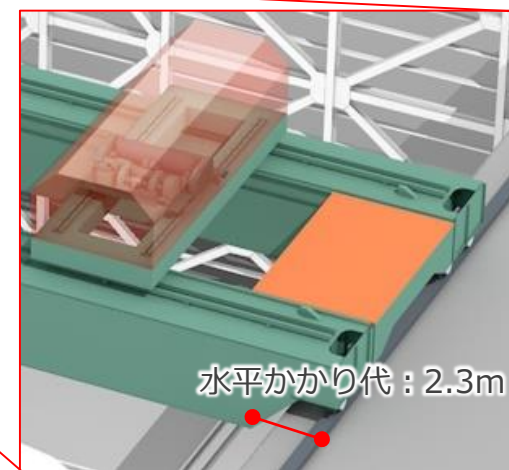
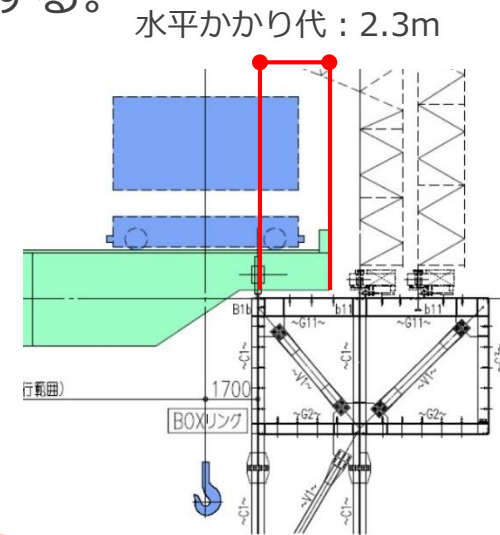
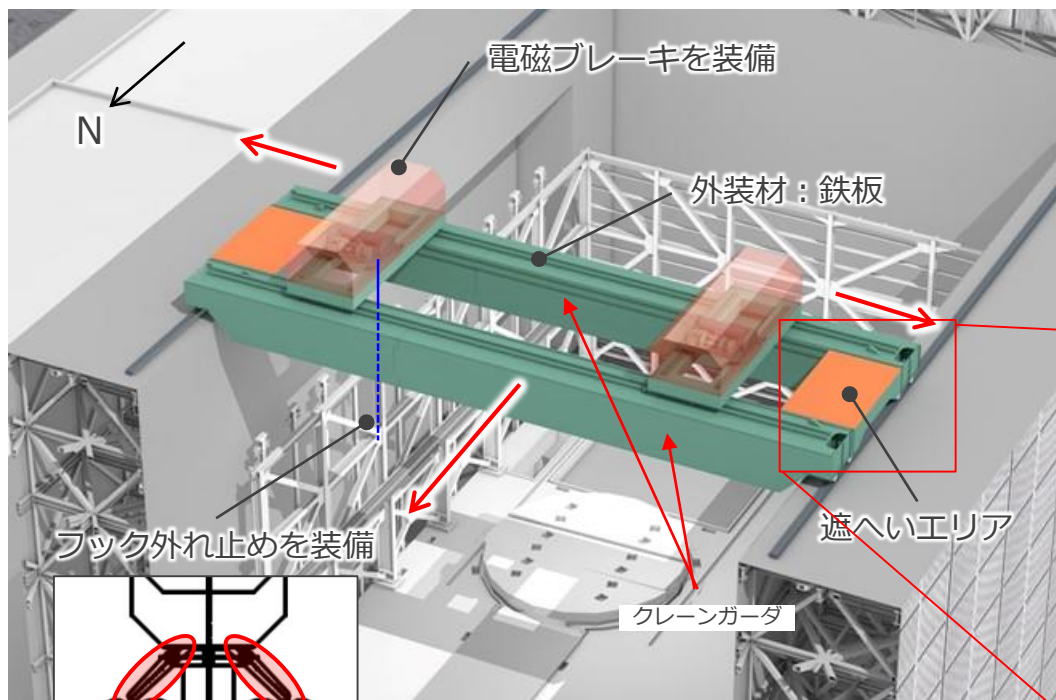
クレーンガーダ

立面図

ガレキ撤去用天井クレーン

大型カバーの概要（ガレキ撤去用天井クレーン）

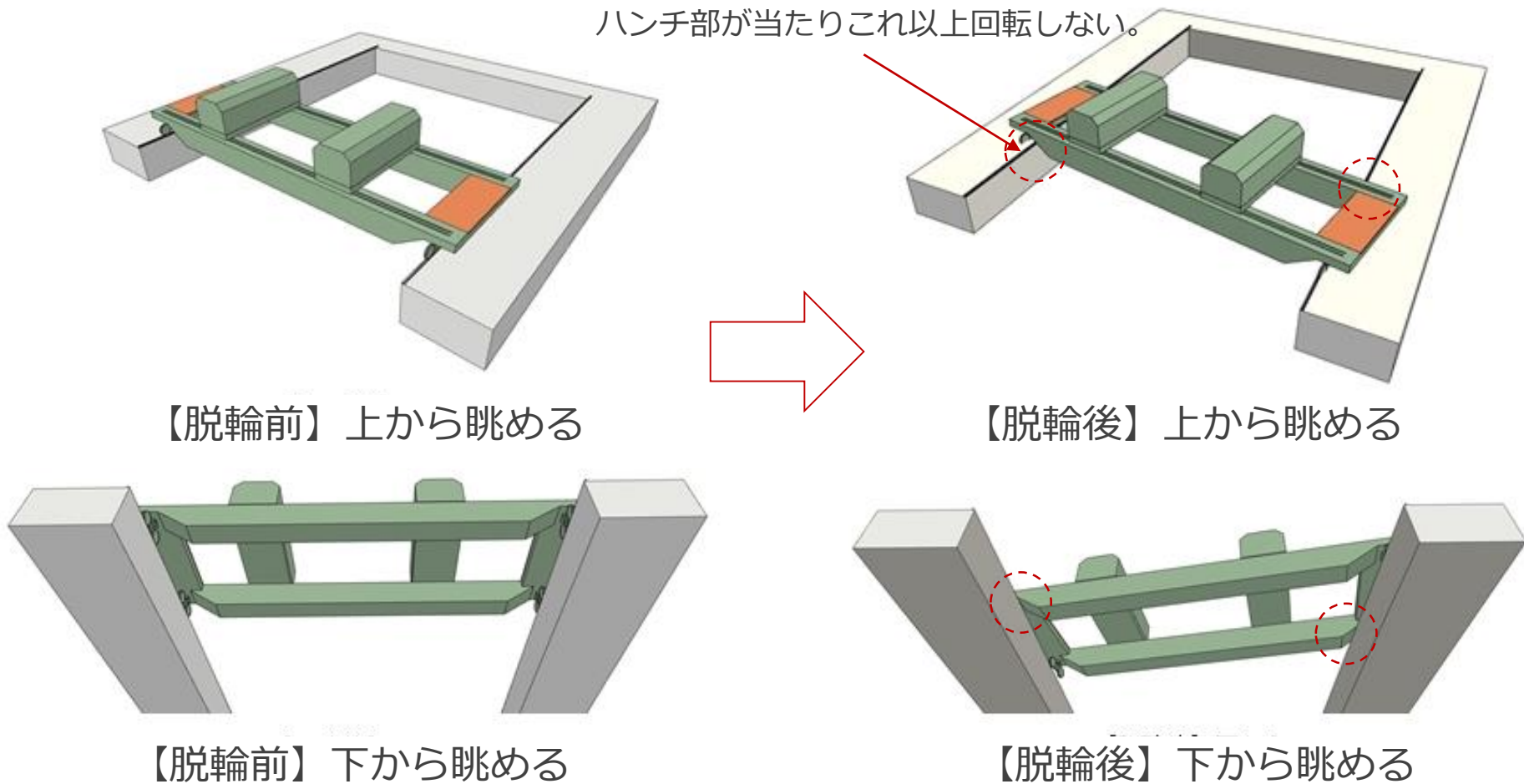
- クレーン端部に2.3mの水平かかり代を設け、地震時のクレーン落下を回避する。
- 天井クレーン不使用時はカバー北側に駐機する。
- 電源喪失時に電磁ブレーキにより揚重状態を保持する。
- フックには外れ止めを装備する。



ばね式外れ止め金具

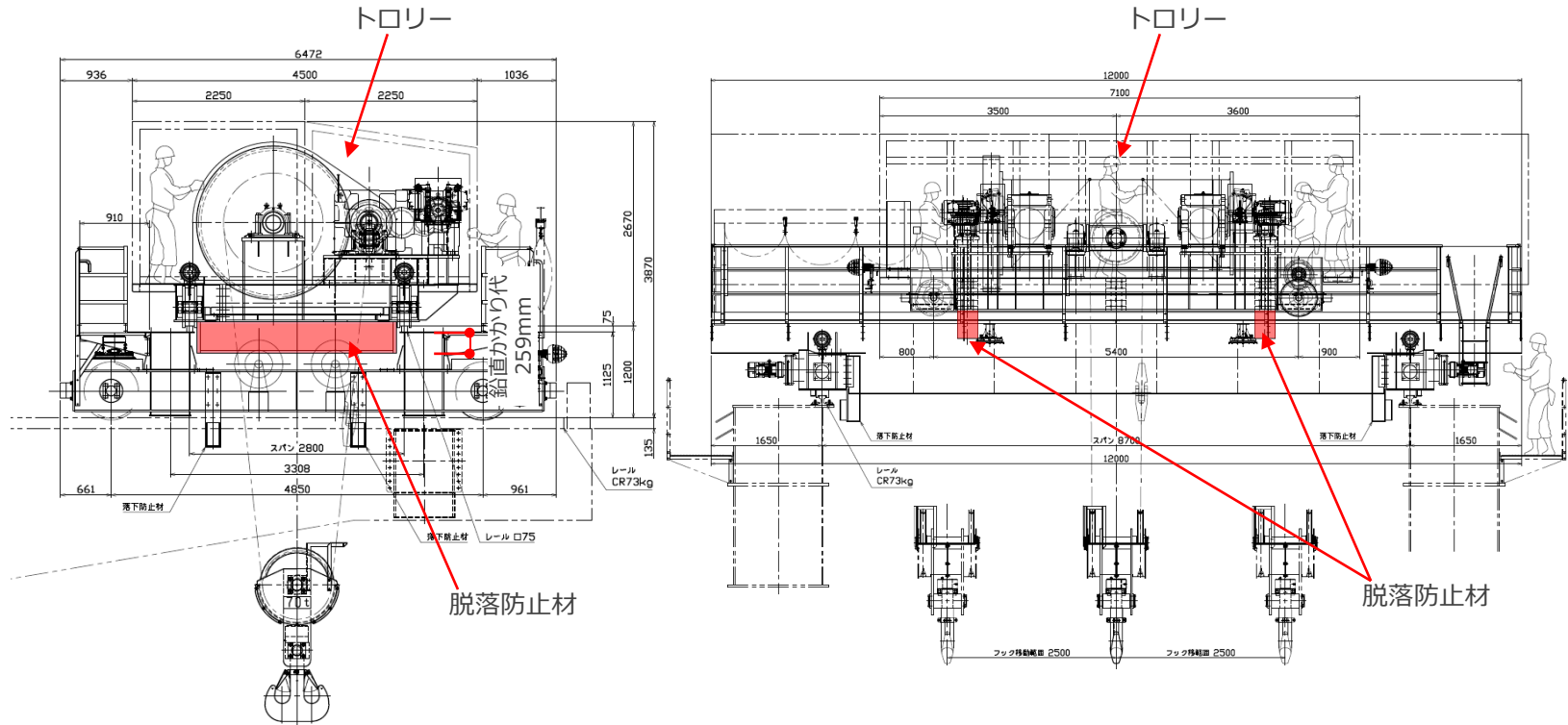
大型カバーの概要（ガレキ撤去用天井クレーン）

- ガレキ撤去用天井クレーンは、万が一がーレールから脱輪して、さらに回転したとしても、クレーンガード端部のハンチ部がカバー架構頂部に当たる形状であることから、物理的に落下しない。



大型カバーの概要（ガレキ撤去用天井クレーン）

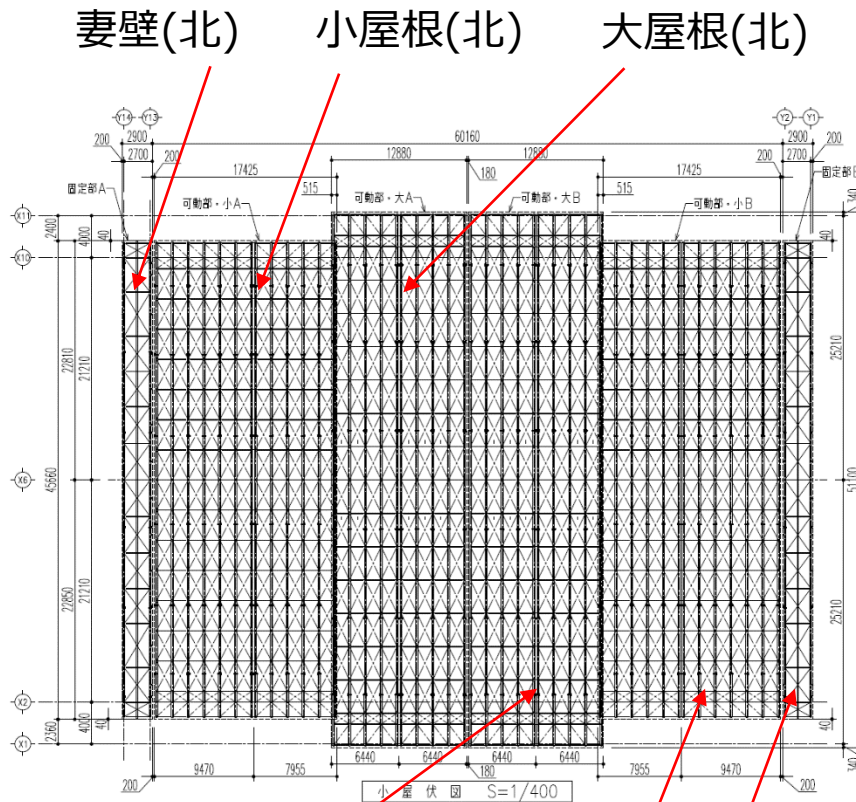
- かかり代が少ないトロリー部には脱落防止材を設置し、地震時のトロリー落下を回避する。



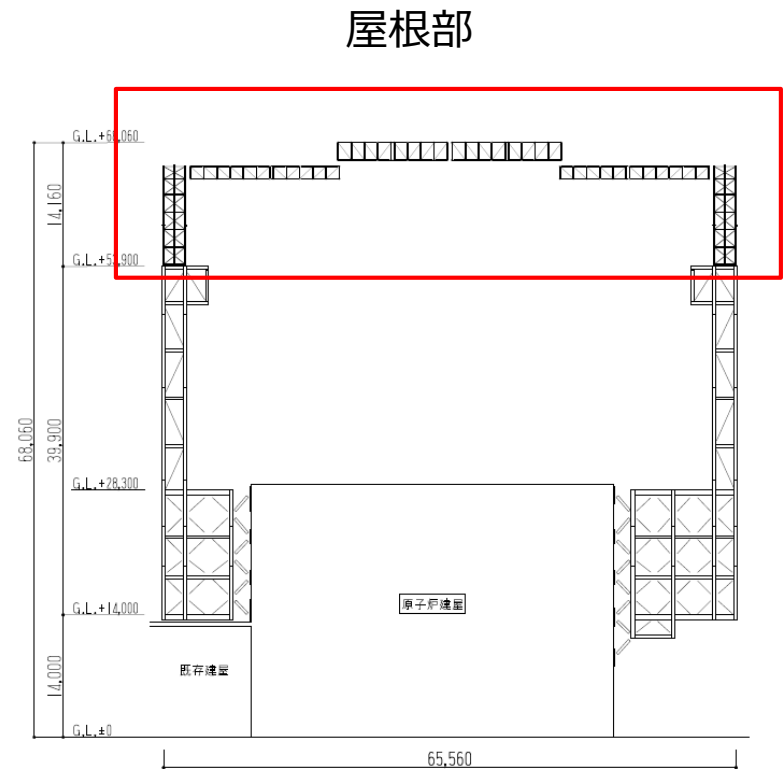
トロリーの脱落防止材（赤色部：H-900×300×16×28(SS400)）

大型カバーの概要（屋根部）

- 大型カバーの屋根は可動式とし、通常時は動かないように固定する。



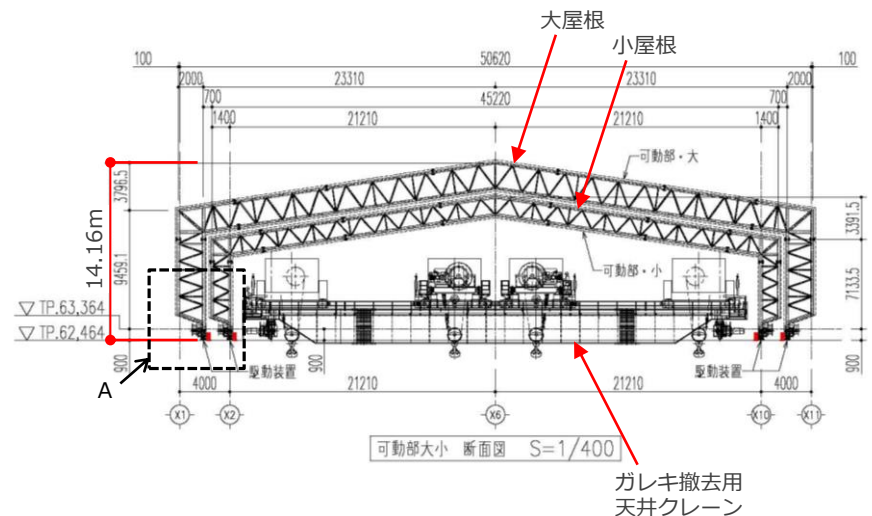
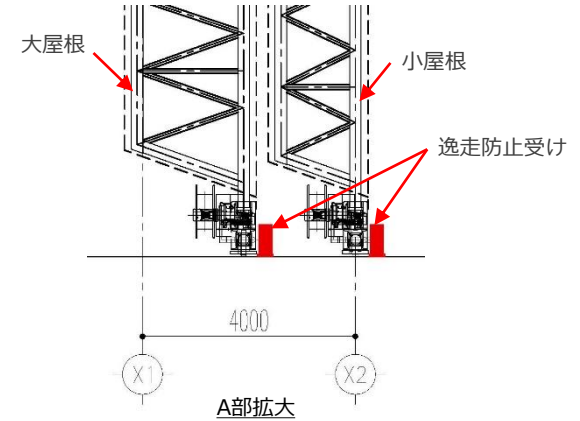
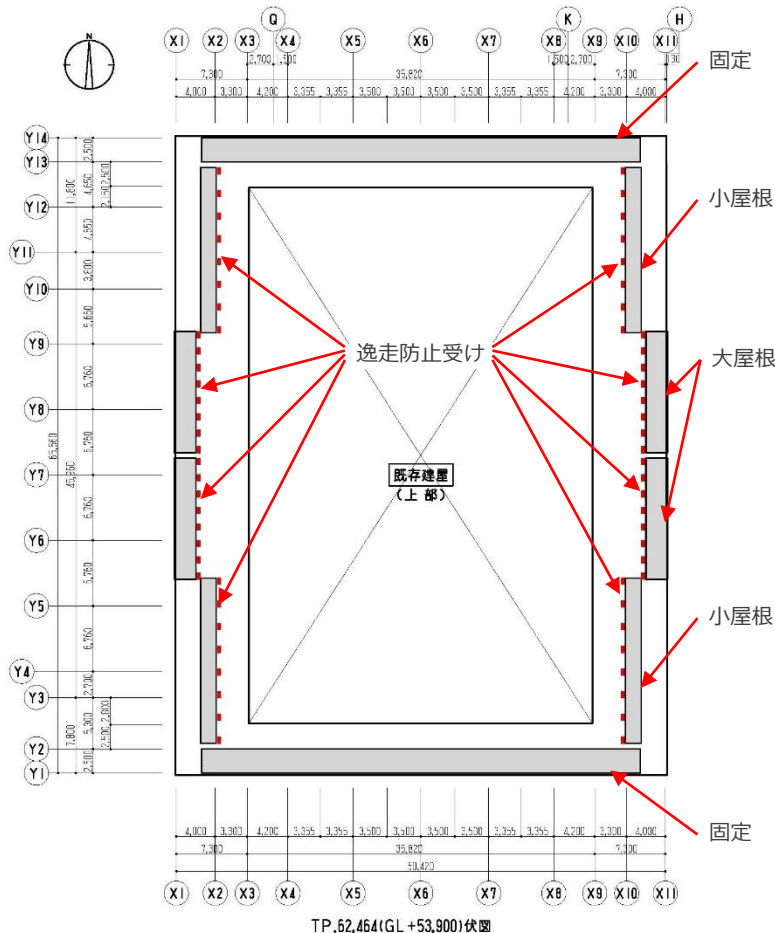
大屋根(南) 小屋根(南) 妻壁(南)
屋根伏図



大型カバー断面図

大型カバーの概要（屋根部）

- 屋根は、通常時は固定ピンで固定されている。
- 一方で、屋根が開閉する際には固定ピンを外されて南北方向に動く。この際、逸走防止受けが落下防止材として働くことにより屋根の落下を防止する。



屋根部の落下防止の概要

地震応答解析の検討方針

- Ss900による損傷評価を実施するにあたっては、大型カバー、原子炉建屋の応答性状を適切に表現できる地震応答解析を用いて評価する。
- 評価にあたっては、原子炉建屋や使用済み燃料プールへの波及的影響を考慮する。
- 地震応答解析は、水平2方向及び鉛直方向へ地震力を同時に入力（以下「3方向同時入力」という）する。
- 検討に用いる地震動は、第27回特定原子力施設監視・評価検討会「東京電力福島第一原子力発電所の外部事象に対する防護の検討について」（平成26年10月3日）にて示した検討用地震動とする。
- また、検討用地震動①については、水平方向の地震動に方向性がないことから、3方向同時入力による検討を行う場合、次ページ以降に示した方法にて作成した模擬地震波を用いる。

評価項目とクライテリア（大型カバー）

- Ss900を受けた大型カバー架構が原子炉建屋や使用済み燃料プール等へ波及的影響を及ぼすかどうか確認するために、下表に示す項目について評価を行う。

部位	考え方	許容限界
大型カバー架構 （一般部）	最大層間変形角が波及的影響を及ぼさないための許容限界を超えないことを確認	層間変形角 1/30 ^{※1}
大型カバー架構 （柱梁・鋼板） （屋根弦材）	部材に生じる応力が許容限界を超えないことを確認，超える場合はエネルギー一定則による評価を実施し，塑性率の許容限界を超えないことを確認	弾性限界強度または 塑性率5.0 ^{※2}
大型カバー架構 （ブレース） （屋根斜材・屋根ブレース）	部材に生じる塑性率が許容限界を超えないことを確認，超える場合は応答による繰返し回数が許容限界に対して十分な裕度を有することを確認	塑性率5.0または 評価最大ひずみ度に対する 破断寿命1.0
大型カバー架構 アンカーボルト	引張とせん断の二乗累加則により検定し許容限界に至らないことを確認	終局強度に対する検定比 1.0

※1: 「震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針（（財）日本建築防災協会）」を参考に許容限界を設定している。
 なお、被災度区分判定基準においては、柱の残留傾斜角が1/30を超えた場合に大破と判定しているが、保守的に最大層間変形角を用いて評価を行う。

※2: JSCA 性能メニュー（社団法人日本建築構造技術者協会，2002年）を参考に定めたクライテリア*

*: 北村他：「性能設計における耐震性能判断基準値に関する研究」，日本建築学会構造系論文集，第604号，pp183-191，2006.6

評価項目とクライテリア（ガレキ撤去用天井クレーン）

- Ss900を受けたガレキ撤去用天井クレーンが原子炉建屋や使用済み燃料プール等へ波及的影響を及ぼすかどうか確認するために、下表に示す項目について評価を行う。

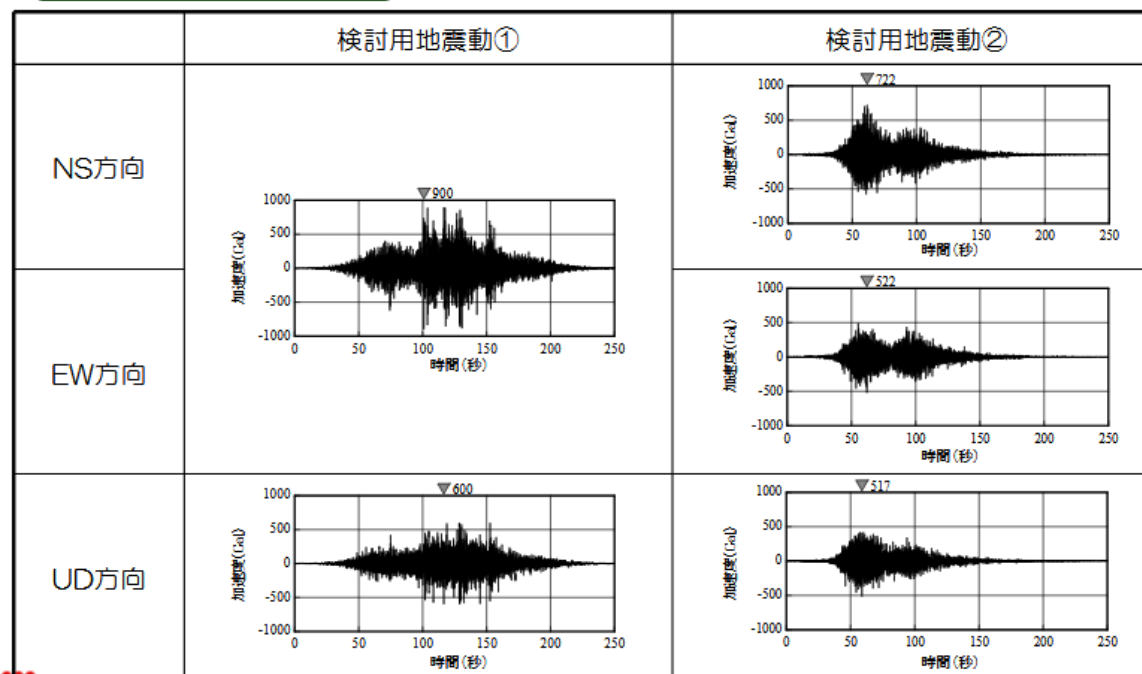
部位	考え方	許容限界
ガレキ撤去用 天井クレーン クレーンガーダ	東西レール間の最大相対水平変位がクレーンの水平かかり代に比べ小さいことを確認	東西レール間相対変位 2.3m
	クレーンガーダの最大応答値が全塑性モーメントを超える不安定状態に至らないことを確認	全塑性モーメント Mp
ガレキ撤去用 天井クレーン トロリー	クレーンガーダの最大応答変位がトロリー脱落防止材の鉛直かかり代に比べ小さいことを確認	鉛直変位 259mm
	トロリーの水平力による脱落防止材の発生応力が弾性限界強度を超えないことを確認	弾性限界せん断強度 149 N/mm ² (SS400)

検討に用いる地震動の概要

- 本検討に用いる地震動は、第27回特定原子力施設監視・評価検討会にてご説明した、検討用地震動（Ss900）とする。
- Ss900は以下の二つの地震動からなるが、Ss900の二つの地震動のうち、振幅が大きく、大型カバーの応答が大きくなる傾向となる検討用地震動①を用いる。

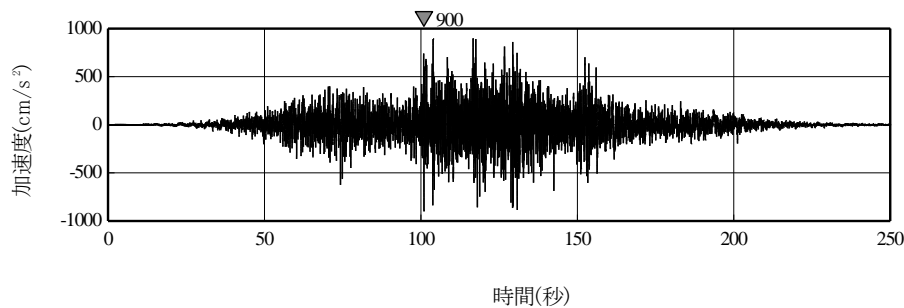
4. 1 検討用地震動の評価（検討用地震動）

加速度時刻歴波形

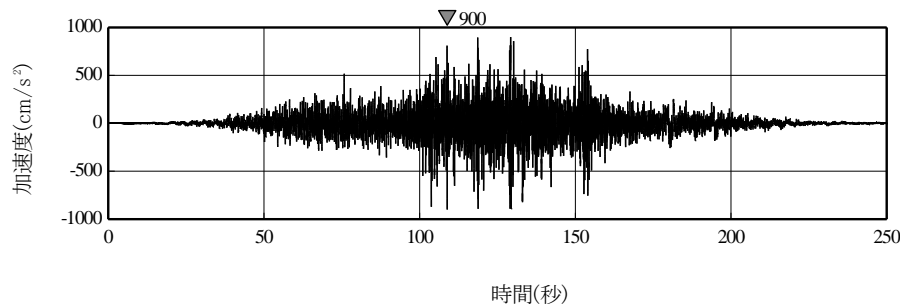


検討に用いる地震動の概要（水平二方向の検討に関して）

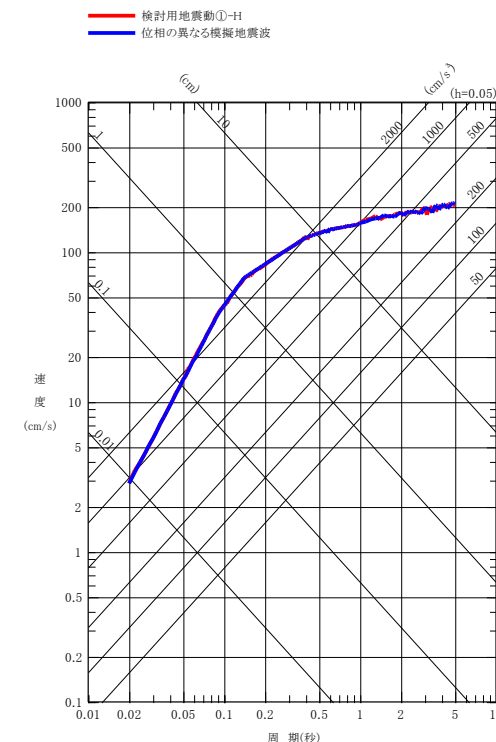
- 水平2方向の影響評価を実施するにあたっては、水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力を行う。
- 影響評価にあたっては、全く同じ地震動が同時に水平2方向に入力されることは現実的に考えにくいいため、検討用地震動①を作成した方法と同一の方法で、目標とする応答スペクトルに適合する位相の異なる模擬地震波を利用する。
- なお、検討用地震動①-Hの位相が、2011年東北地方太平洋沖地震において福島第一原子力発電所敷地内の地震観測記録のNS方向の位相を基に作成していることから、模擬地震波はそれと直交するEW方向の位相を基に作成する。



検討用地震動①-Hの加速度時刻歴波形



位相の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形



検討用地震動①の設計用応答スペクトル

観測記録を用いた位相差の確認①

- なお、念のために自由地盤系南地点（O.P.-200m）の観測記録から、当該サイトにおいて、水平2方向の地震波で位相差が生じる傾向を確認した。確認の方法として、検討用地震動①を同時に水平2方向に入力した場合のオービット（図1）と、観測記録の水平2方向のオービット（図2及び図3）との比較を行った。図1から、全く同じ地震動を同時に水平2方向に入力した場合、オービットは現実的に考えにくい45°方向に直線的な軌跡を示す。一方、図2及び図3より観測記録ではオービットは位相差によって生じるランダムな軌跡を示すことを確認した。

本資料におけるO.P.表記は震災前の「旧O.P.表記」を指す。T.P.表記に換算する際は、震災後の地盤沈下量(-709mm)とO.P.からT.P.への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算する。
(換算式) T.P. = 旧O.P. -1,436mm

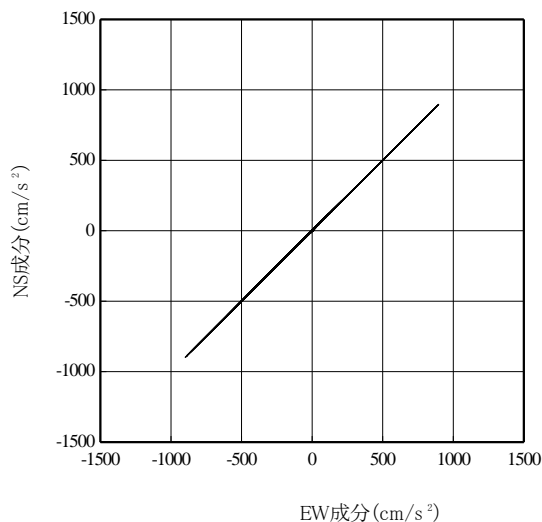


図1 検討用地震動
水平2方向の加速度成分のオービット

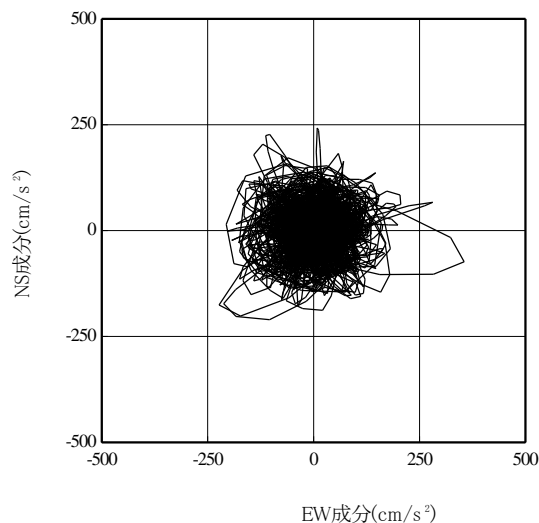


図2 2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録
水平2方向の加速度成分のオービット

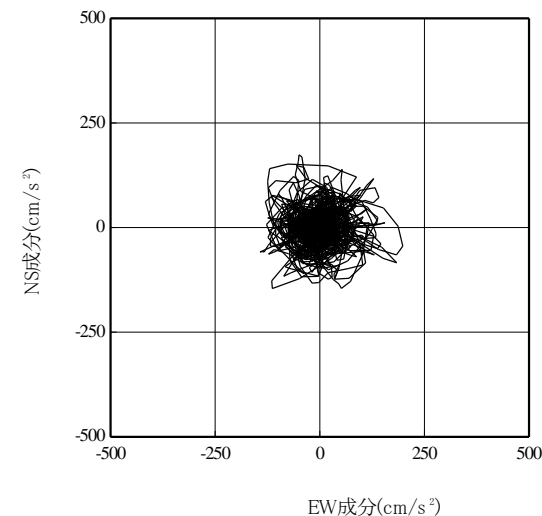


図3 2021年2月13日福島県沖地震の観測記録
水平2方向の加速度成分のオービット

観測記録を用いた位相差の確認②

- また、検討用地震動①と位相の異なる模擬地震波を水平2方向に入力した場合のオービット（図4）と観測記録の水平2方向のオービット（図2及び図3）との比較を行った。図4のオービットはランダムな軌跡を示し、実際の観測記録と似たような軌跡を示すことを確認した。

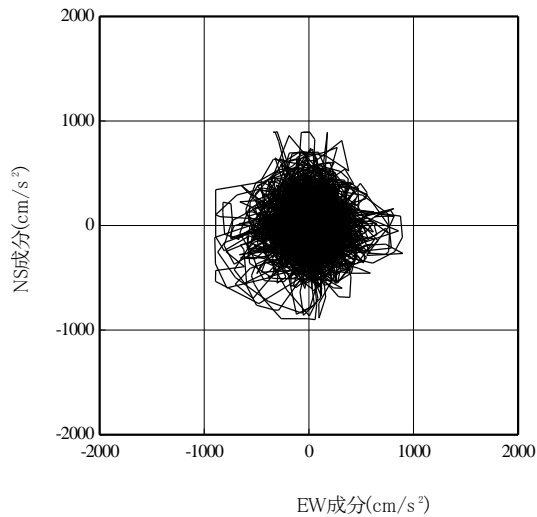


図4 検討用地震動①と位相の異なる模擬地震波の水平2方向の加速度成分のオービット

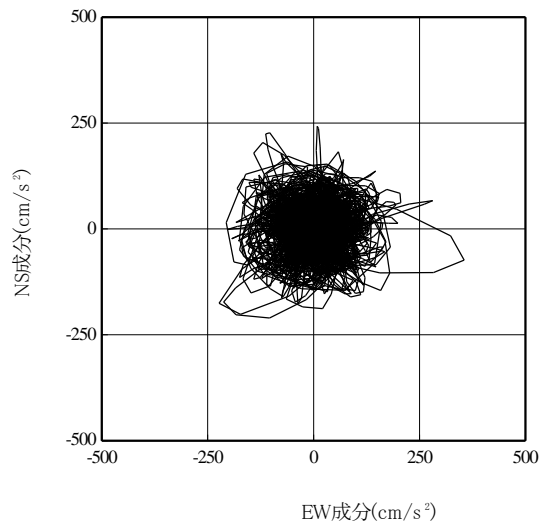


図2 2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録水平2方向の加速度成分のオービット

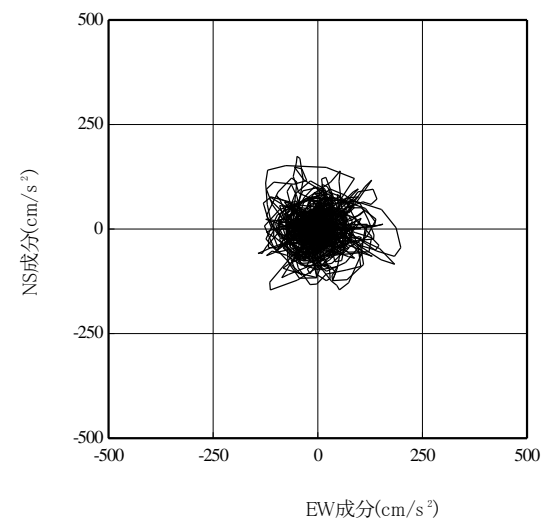


図3 2021年2月13日福島県沖地震の観測記録水平2方向の加速度成分のオービット

観測記録を用いた位相差の確認③

- 2022年3月16日に発生した福島県沖の地震の観測記録との比較を実施した。
- 検討用地震動と観測記録のオービットは、ランダムな軌跡を示し、実際の観測記録と似たような軌跡であることを追加で確認した。
- このため、位相の異なる模擬地震波はサイトの状況を踏まえた適切なものとなっており、妥当であると考えている。

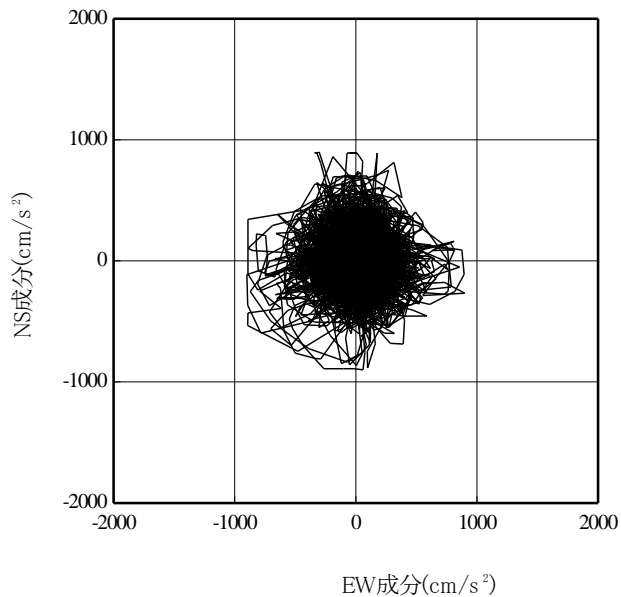


図4 検討用地震動①と
位相の異なる模擬地震波の
水平2方向の加速度成分のオービット（再掲）

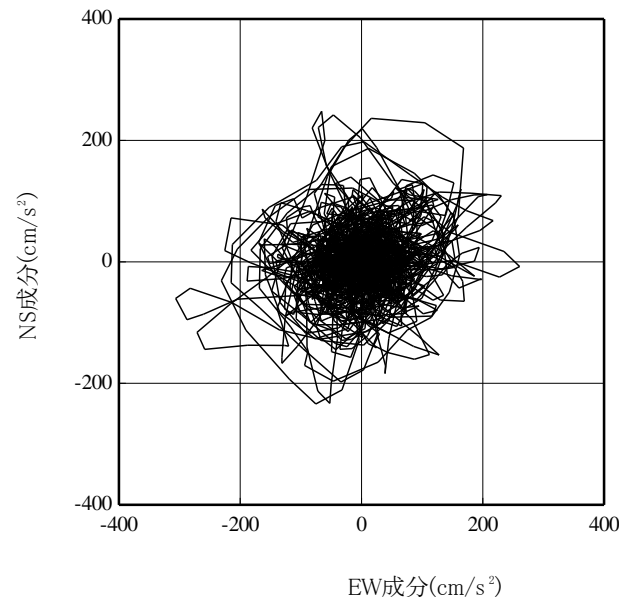


図5 2022年3月16日福島県沖の地震の観測記録
水平2方向の加速度成分のオービット

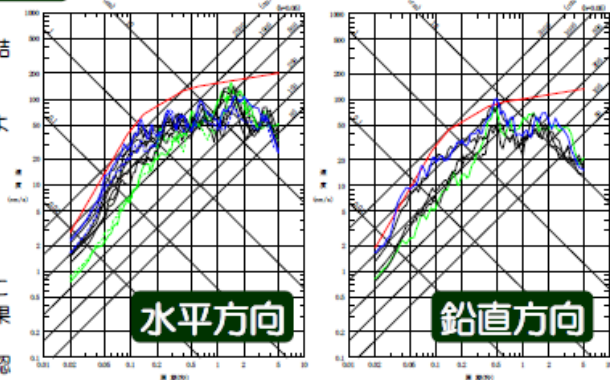
(参考) 検討用地震動の概要

- 検討用地震動①は、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動であるプレート間地震，内陸地殻内地震，海洋プレート内地震のそれぞれの検討用地震の地震動評価結果及び震源を特定せず策定する地震動を踏まえ，最大加速度値 水平900gal，鉛直600galの応答スペクトルを策定。
- 検討用地震動②は，プレート間地震の検討用地震である3.11型地震の強震動生成域の位置の不確かさを考慮したケースの評価結果（最大加速度値 NS:722gal，EW:522gal，UD:517gal）を採用して策定。

プレート間地震

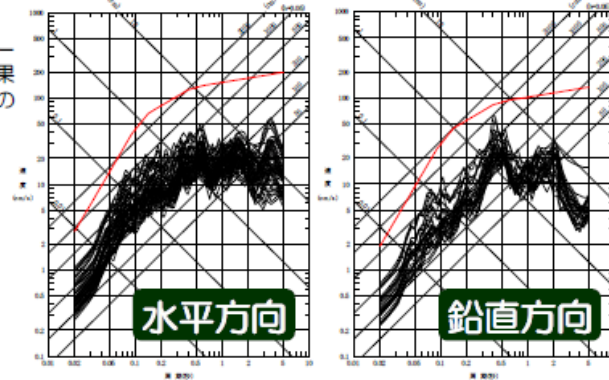
3.11型地震の地震動評価結果，2011年東北地方太平洋沖地震解放基盤波，川辺・釜江(2013)モデルによるシミュレーション結果(緑)と検討用地震動①(赤)，②(青)の比較

川辺・釜江(2013)モデルによるシミュレーション結果(緑)は検討用地震動①(赤)を下回ることを確認



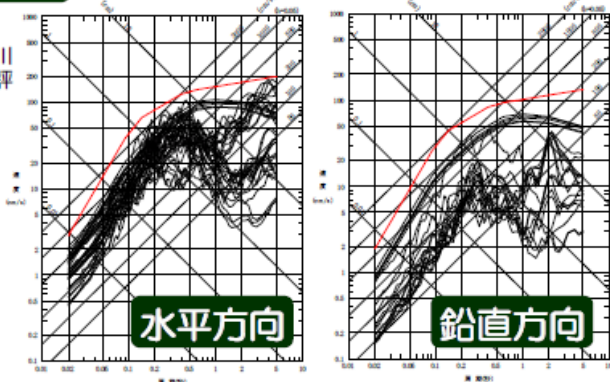
海洋プレート内地震

敷地前面の想定海洋プレート内地震の地震動評価結果と検討用地震動①(赤)の比較



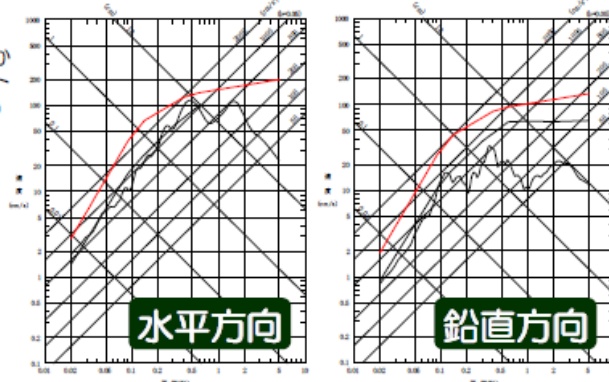
内陸地殻内地震

双葉断層による地震・畑川断層による地震の地震動評価結果と検討用地震動①(赤)の比較



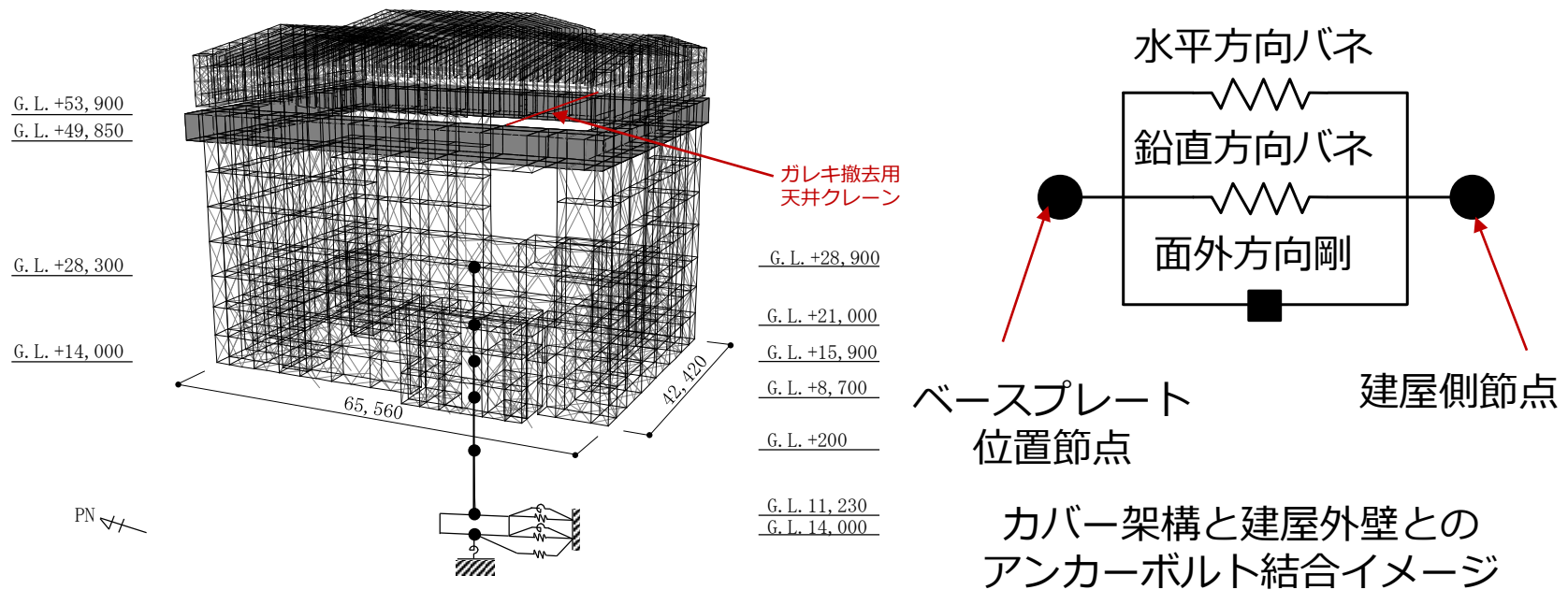
震源を特定せず策定する地震動

加藤ほか(2004)・佐藤ほか(2013)による応答スペクトルと検討用地震動①(赤)の比較



Ss900に対する検討（解析モデルの概要）

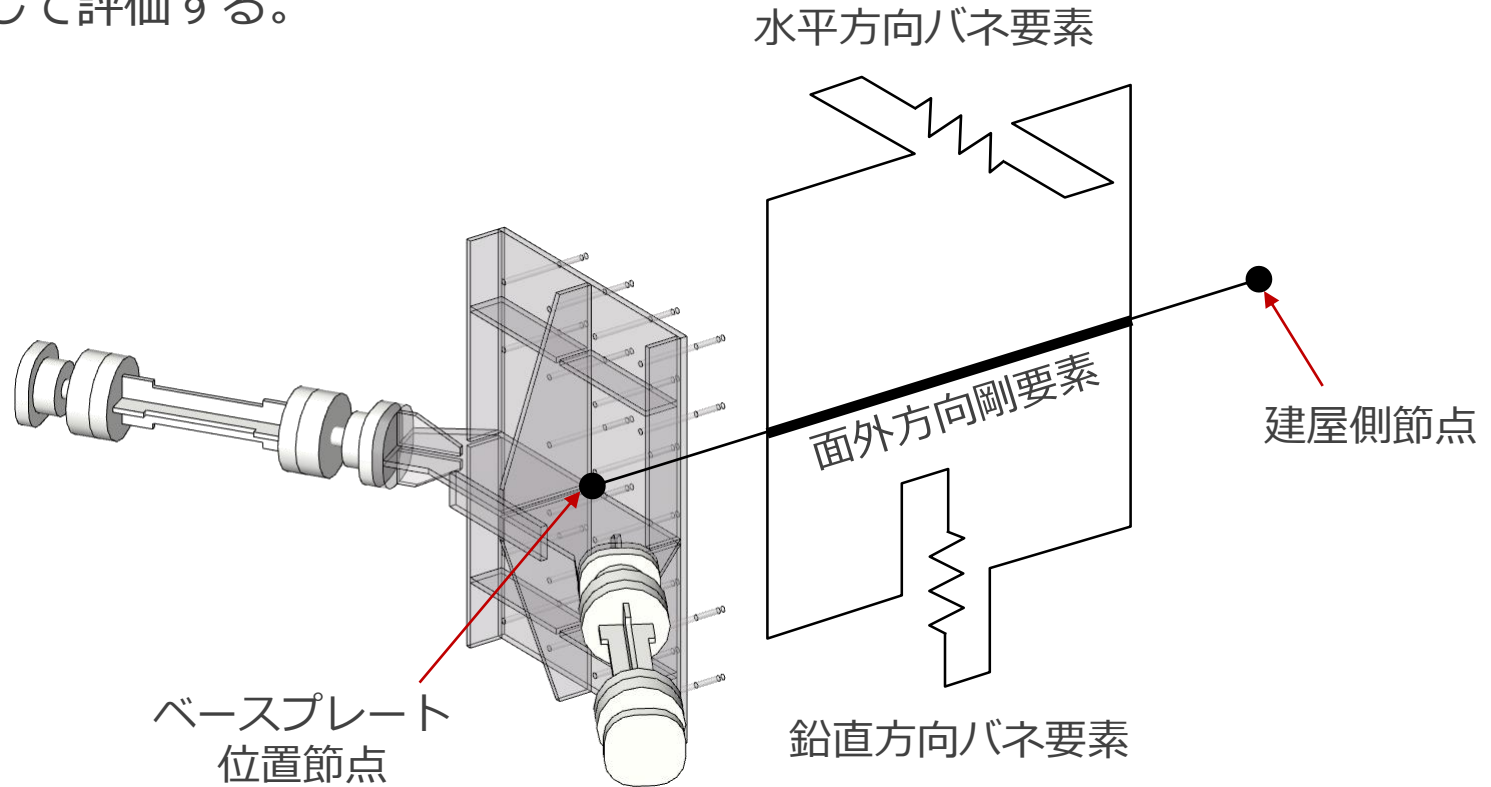
- 建屋質点系モデルの脚部には、Ss900地震により算定した等価地盤物性に基づくスウェイロッキングばねおよび側面地盤Novakばねを設けている。質点系モデルの軸方向は弾性とし、曲げとせん断に「JEAG4601-1991」に示されている非線形特性を考慮する。
- 3方向同時入力を実施していることから、誘発上下動は本モデルで考慮されている。



Ss900検討用モデル

Ss900に対する検討（原子炉建屋接合部のモデル）

- 大型カバーの地震応答解析モデルにおけるカバー架構と原子炉建屋の接合部については、アンカーボルトで接続していることを考慮してモデル化している。
- カバー架構と原子炉建屋を接続しているアンカーボルトは、発生するせん断力が大きいことから、せん断力が生じる水平方向及び鉛直方向はバイリニアのばね要素として評価する。一方で、面外方向は発生する応力が小さいことから、剛要素として評価する。



カバー架構と建屋外壁とのアンカーボルト結合イメージ

Ss900に対する検討（大型カバー架構のモデル化）

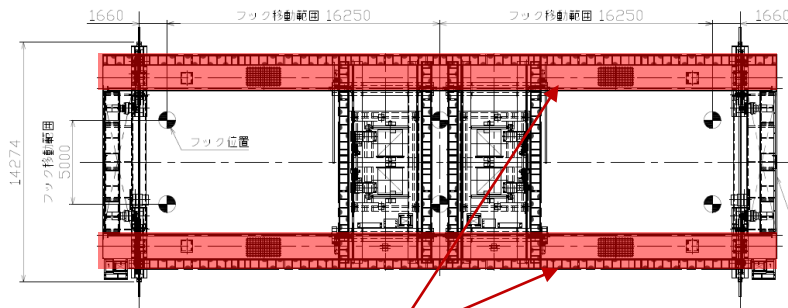
- 大型カバー架構一般部，燃料取扱設備支持部，屋根部およびガレキ撤去用天井クレーンの鉄骨物性値を下表に示す。
- 大型カバー架構のブレースおよび屋根斜材は「鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究」（日本建築学会構造工学論文集37B号1991年3月）に示された修正若林モデルによる非線形特性を考慮する。
- アンカーボルトには大きなせん断力が作用するため，せん断終局強度の75%に達すると固定度が低下するバイリニア型ばねで建屋と結合する。

大型カバー架構およびガレキ撤去用天井クレーンの物性値

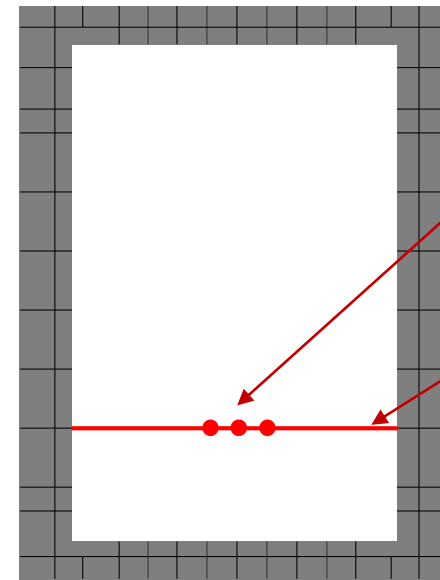
部位	ヤング係数 E(N/mm ²)	ポアソン比 ν	減衰定数 h(%)	材質
大型カバー架構 一般部 燃料取扱設備支持部	2.05×10 ⁵	0.3	2	SN400, SM490, SN490
大型カバー架構 屋根部	2.05×10 ⁵	0.3	2	STK490, STK400, SNR490, SNR400
ガレキ撤去用 天井クレーン	2.05×10 ⁵	0.3	2	SM490
大型カバー架構 アンカーボルト	2.05×10 ⁵	0.3	-	SNR490B

Ss900に対する検討（ガレキ撤去用天井クレーンのモデル化）

- ガレキ撤去用天井クレーンは全長が40.2m、2本のクレーンガーダ（B×D：1500mm×2700mm）でトロリー（吊り荷含140ton）を支持している。
- ガレキ撤去用天井クレーンは、鉛直方向にはレール位置でピン支持、水平方向にはクレーンの車輪により拘束されていることから、固定とする。

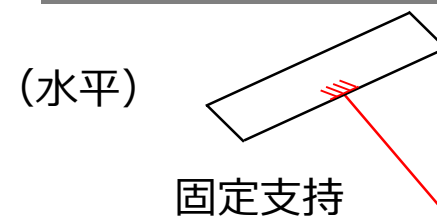
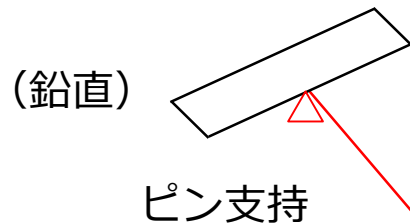


クレーンガーダ



トロリー重量
考慮節点

ガレキ撤去用天井
クレーンモデル

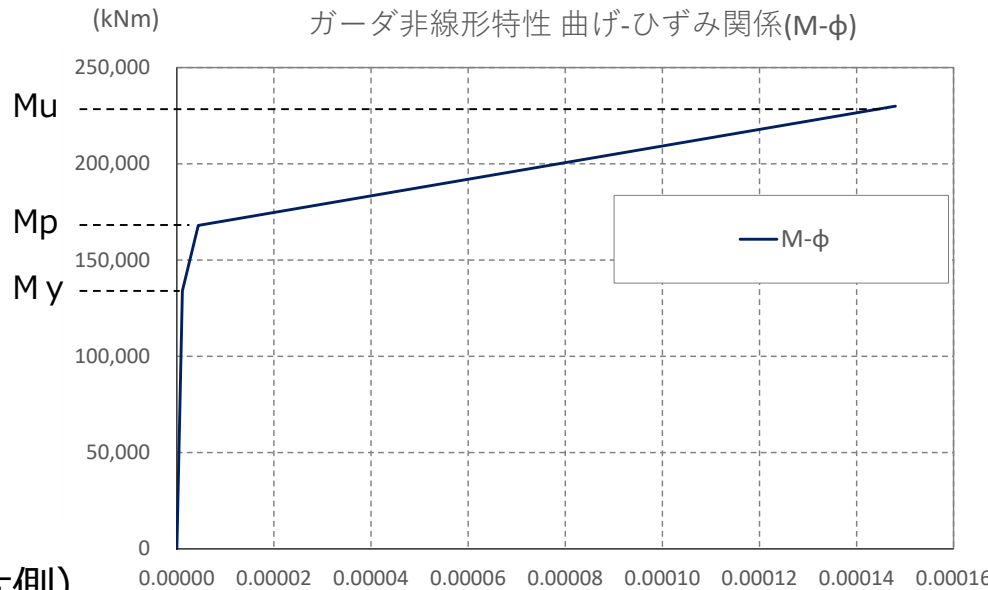
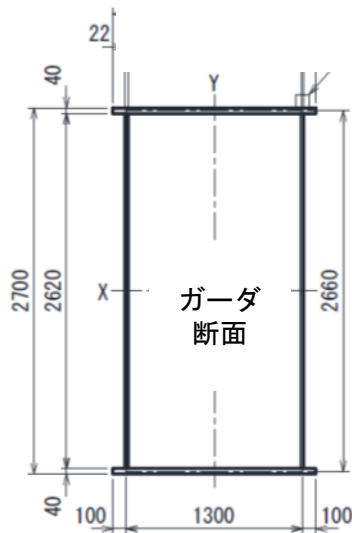


Ss900に対する検討 (ガレキ撤去用天井クレーンのモデル化)

- ガレキ撤去用天井クレーンの解析モデルは、2本のクレーンガーダを1本の線材要素でモデル化する。
- クレーンガーダは、弾塑性特性※を付与し、トロリーはクレーン中央位置に付加重量として与える。

※ 降伏限界ひずみは塑性変形能力を保つ塑性率4を目安に0.6% (「AIJ 鋼構造塑性設計指針」参考), 終局ひずみは破断のびを目安に20%と設定 (「JIS G 3106 (SM490材)」参考)

第1折れ点 : 短期許容 $M_y (=2 \cdot f_y \cdot Z_e, f_y = 325)$, $\phi_y (=f_y/E/ (D/2))$
 第2折れ点 : 全塑性耐力 $M_p (=2 \cdot 1.1 \cdot f_y \cdot Z_u)$, $\phi_p (= \epsilon_p/ (D/2))$, $\epsilon_p = 0.6\%$
 終局点 : 破断耐力 $M_u (=2 \cdot f_u \cdot Z_u, f_u = 490)$, $\phi_u (= \epsilon_u/ (D/2))$, $\epsilon_u = 20\%$



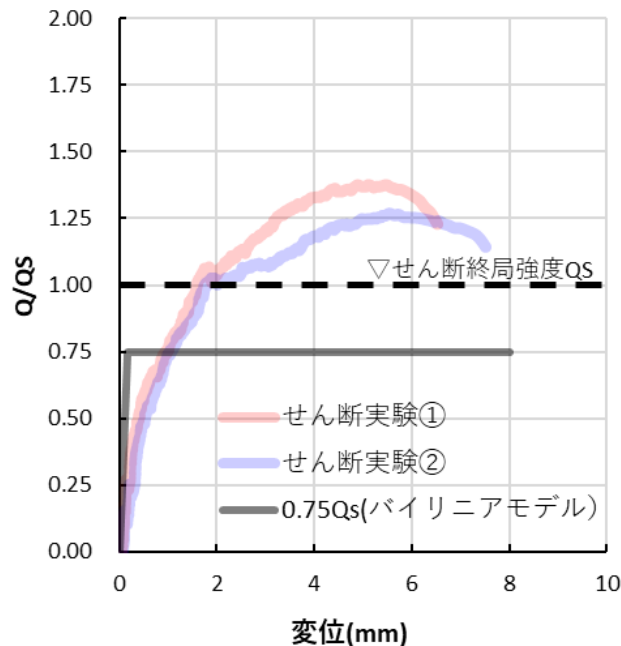
D : 部材せい(mm)
 E : ヤング係数(N/mm²)
 Ze : 断面係数(mm³)
 Zu : 塑性断面係数(mm³)
 fy : 降伏強度(N/mm²)
 fu : 終局強度(N/mm²)
 εp : 降伏限界ひずみ
 εu : 終局ひずみ

クレーンガーダ (片側)
の構造概要

クレーンガーダの弾塑性曲げ特性

Ss900に対する検討（原子炉建屋接合部）

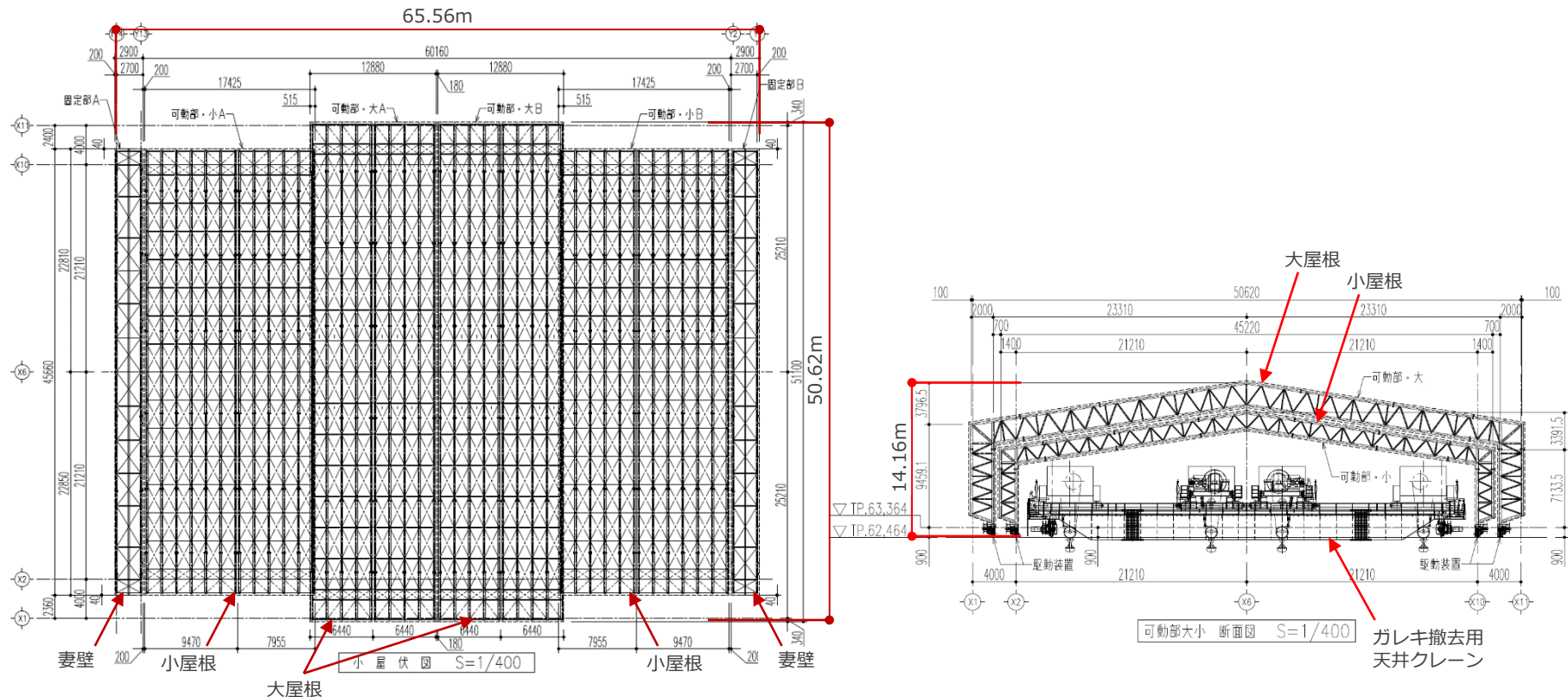
- 本形式のアンカーボルトは、アンカーボルトに大きなせん断力が作用するため、せん断終局強度の75%に達すると固定度が低下するバイリニア型ばねで建屋と結合するモデルとする。なお、初期剛性はアンカーボルトの芯材のみを考慮する。
- 今回の地震応答解析においては、原子炉建屋の壁が健全な状態であるとして評価を実施しており、外壁調査の結果に応じてその状態を見直す。
- アンカーボルトのバイリニア型ばねのモデルと、参考までに今回行ったせん断実験の荷重-変位関係も併せて示す（第10回面談資料P45，せん断試験結果ひび割れ幅0mm（壁が健全である）①②の結果を引用）。



アンカーボルトのバイリニアモデル

Ss900に対する検討（屋根部のモデル化）

- 大型カバーの全体的な影響を把握する観点から、中央の「大屋根」に加え「小屋根」「妻壁」および「ガレキ撤去用天井クレーン」を全てモデル化する。
- 屋根部は、東西方向50.62m、南北方向65.56m、高さ14.16mである。設計進捗により屋根の高さ、幅分割および材質の一部を初回申請時から変更している。



大型カバー架構 屋根部の構造概要

Ss900に対する検討（建屋のモデル化①）

ガレキ撤去時の原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
水平（NS）方向

G.L.(m)	質点重量* W (kN)	回転慣性重量 I_G ($\times 10^5$ kN \cdot m 2)	せん断断面積 A_s (m 2)	断面二次モーメント I (m 4)
+28.90	58690	84.43		
+21.00	72170	103.90	135.0	16012
+15.90	77220	111.11	160.8	21727
+8.70	87200	125.53	132.8	24274
+0.20	162800	234.31	155.6	36481
-11.23	185210	266.64	294.0	52858
-14.00	62400	89.83	1914.3	275530
合計	705690		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m 2)	
			せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m 2)	
			ポアソン比 ν 0.20	
			減衰 h 5%	

*：「II.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料－2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」において用いた各階重量

Ss900に対する検討（建屋のモデル化②）

ガレキ撤去時の原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
水平（EW）方向

G.L.(m)	質点重量* W (kN)	回転慣性重量 I_G ($\times 10^5$ kN \cdot m 2)	せん断断面積 A_s (m 2)	断面二次モーメント I (m 4)
+28.90	58690	48.33		
+21.00	72170	59.41	102.7	9702
+15.90	77220	63.55	163.9	13576
+8.70	87200	125.53	131.6	14559
+0.20	162800	234.31	197.8	36427
-11.23	185210	327.39	294.0	52858
-14.00	62400	110.32	1914.3	338428
合計	705690		ヤング係数 E_c 2.57 $\times 10^7$ (kN/m 2)	
			せん断弾性係数G 1.07 $\times 10^7$ (kN/m 2)	
			ポアソン比 ν 0.20	
			減衰h 5%	

*：「II.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料-2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」において用いた各階重量

Ss900に対する検討（建屋のモデル化③）

ガレキ撤去時の原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
鉛直方向

G.L.(m)	質点重量* W (kN)	軸断面積 A _N (m ²)	軸ばね剛性 K _A (×10 ⁸ kN/m)
+28.90	58690		
+21.00	72170	151.1	4.92
+15.90	77220	205.0	10.33
+8.70	87200	221.7	7.91
+0.20	162800	301.0	9.10
-11.23	185210	495.7	11.15
-14.00	62400	1914.3	177.61
合計	705690	ヤング係数Ec	2.57×10 ⁷ (kN/m ²)
		せん断弾性係数G	1.07×10 ⁷ (kN/m ²)
		ポアソン比ν	0.20
		減衰h	5%

*：「II.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料－2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」において用いた各階重量

Ss900に対する検討（建屋のモデル化④）

燃料取り出し時の原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
水平（NS）方向

G.L.(m)	質点重量* W (kN)	回転慣性重量 I_G ($\times 10^5$ kN \cdot m 2)	せん断断面積 A_s (m 2)	断面二次モーメント I (m 4)
+28.90	106080	152.60		
+21.00	72170	103.90	135.0	16012
+15.90	77220	111.11	160.8	21727
+8.70	87730	126.29	132.8	24274
+0.20	163140	234.80	155.6	36481
-11.23	185210	266.64	294.0	52858
-14.00	62400	89.83	1914.3	275530
合計	753950		ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m 2)	
			せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m 2)	

ポアソン比 ν 0.20

減衰 h 5%

*：「II.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料-2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」において用いた各階重量にガレキ撤去等による重量増減を考慮した数値

Ss900に対する検討（建屋のモデル化⑤）

燃料取り出し時の原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
水平（EW）方向

G.L.(m)	質点重量* W (kN)	回転慣性重量 I_G ($\times 10^5$ kN \cdot m 2)	せん断断面積 A_s (m 2)	断面二次モーメント I (m 4)
+28.90	106080	87.35		
+21.00	72170	59.41	102.7	9702
+15.90	77220	63.55	163.9	13576
+8.70	87730	126.29	131.6	14559
+0.20	163140	234.80	197.8	36427
-11.23	185210	327.39	294.0	52858
-14.00	62400	110.32	1914.3	338428
合計	753950		ヤング係数Ec 2.57×10^7 (kN/m 2)	
			せん断弾性係数G 1.07×10^7 (kN/m 2)	
			ポアソン比v 0.20	
			減衰h 5%	

*：「II.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料-2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」において用いた各階重量にガレキ撤去等による重量増減を考慮した数値

Ss900に対する検討（建屋のモデル化⑥）

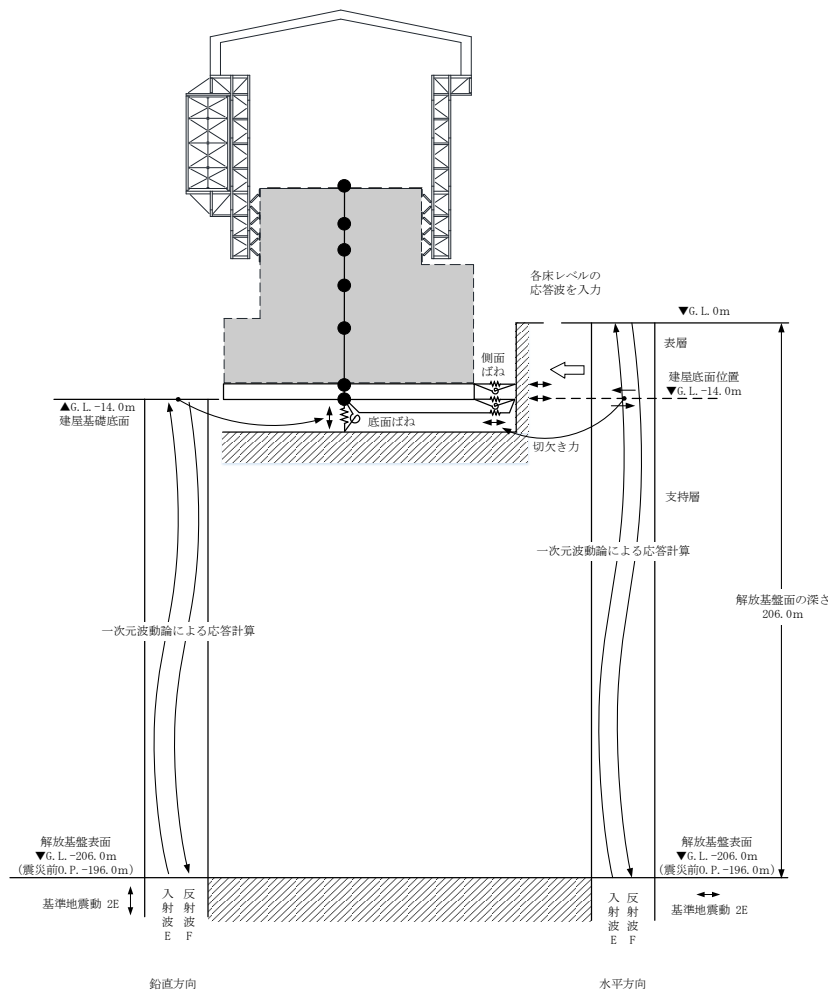
燃料取り出し時の原子炉建屋の地震応答解析モデルの諸元
鉛直方向

G.L.(m)	質点重量* W (kN)	軸断面積 A_N (m ²)	軸ばね剛性 K_A (×10 ⁸ kN/m)
+28.90	106080		
+21.00	72170	151.1	4.92
+15.90	77220	205.0	10.33
+8.70	87730	221.7	7.91
+0.20	163140	301.0	9.10
-11.23	185210	495.7	11.15
-14.00	62400	1914.3	177.61
合計	753950	ヤング係数 E_c	2.57×10 ⁷ (kN/m ²)
		せん断弾性係数 G	1.07×10 ⁷ (kN/m ²)
		ポアソン比 ν	0.20
		減衰 h	5%

*：「II.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料-2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」において用いた各階重量にガレキ撤去等による重量増減を考慮した数値

Ss900に対する検討（入力地震動）

- 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図を下図に示す。モデルに入力する地震動は一次元波動論に基づき，解放基盤表面で定義されるSs900に対する地盤の応答として評価する。



入力地震動の概念図

- Ss900に対する等価地盤定数を下表に示す。

地盤定数

G.L. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位 体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン 比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^5$ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
0.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.04	2.62	0.85	6.01	4	8.1
-8.1	泥岩	450	16.5	0.464	2.32	3.41	0.78	6.79	3	11.9
-20.0		500	17.1	0.455	2.96	4.36	0.78	8.61	3	70.0
-90.0		560	17.6	0.446	3.83	5.63	0.78	11.08	3	28.0
-118.0		600	17.8	0.442	4.44	6.53	0.78	12.80	3	88.0
-206.0		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

Ss900に対する検討（解析ケース）

- ガレキ撤去時と燃料取り出し時の2ケースについて地震応答解析を行う。
- ガレキ撤去時は、使用済み燃料プール上部にガレキ撤去用天井クレーンを配置し、定格揚重重量相当のガレキを吊った状態を想定する。
- 燃料取り出し時は、ガレキ撤去用天井クレーンの使用頻度は低いため、北側配置で吊り荷なしの状態を想定する。

解析ケース一覧

ケース No.	状態	入力地震動 (3方向同時入力)			ガレキ撤去用 天井クレーン状態
		NS方向	EW方向	UD方向	
1	ガレキ撤去時	Ss900 + N S (N→S)	Ss900 + E W (E→W)	Ss900 +UD (U→D)	プール上部配置 吊り荷考慮
2	燃料取り出し時	同上	同上	同上	北側配置 吊り荷なし

Ss900に対する検討（層間変形角の評価結果）

- 大型カバー架構一般部の層間変形角を下表に示す。
- ガレキ撤去時及び燃料取り出し時の最大層間変形角は、許容限界である1/30を超えないことを確認した。

最大応答層間変形角（ガレキ撤去時）

方向	地震条件	検討箇所	最大層間変形角	許容限界	判定
南北方向	Ss900 (+NS+EW+UD)	G.L.+53.9(m) ~+28.3(m) h=25.6(m)	1/87	1/30	O.K.
東西方向	Ss900 (+NS+EW+UD)	G.L.+53.9(m) ~+28.3(m) h=25.6(m)	1/84	1/30	O.K.

最大応答層間変形角（燃料取り出し時）

方向	地震条件	検討箇所	最大層間変形角	許容限界	判定
南北方向	Ss900 (+NS+EW+UD)	G.L.+53.9(m) ~+28.3(m) h=25.6(m)	1/73	1/30	O.K.
東西方向	Ss900 (+NS+EW+UD)	G.L.+53.9(m) ~+28.3(m) h=25.6(m)	1/78	1/30	O.K.

Ss900に対する検討（カバー架構の鉄骨検討結果①）

- 大型カバー架構（一般部）の断面検討結果を下表に示す。
- 柱、梁は一部で弾性限界を超えるものの、エネルギー一定則による評価で最大塑性率が5を超えないことを確認した。なお、弾性限に対する検定比は（）内に示す。
- また、ブレース、鋼板の最大塑性率は5を超えないことを確認した。

断面検討結果（一般部，ガレキ撤去時）

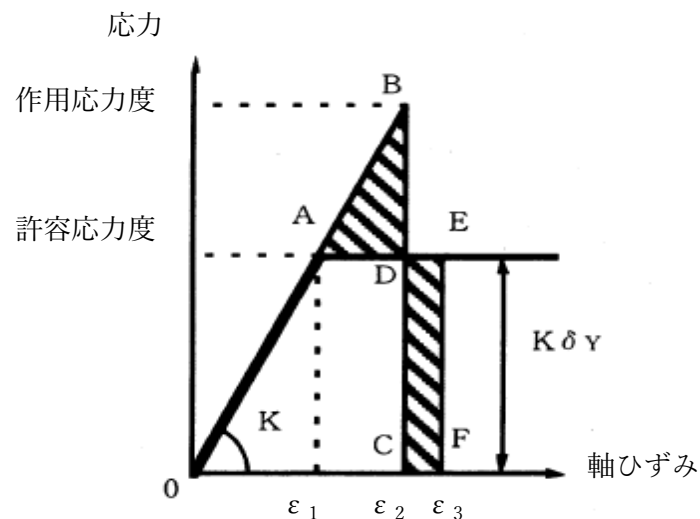
部位	部材形状 (mm)	地震条件		最大応力度 (N/mm ²)		許容応力度 (N/mm ²)		最大塑性率	判定
				σ_c		f_c			
柱	H-400×400×13×21	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	343.0	f_c	320.4	1.08(1.08)	O.K.
梁	H-800×300×14×26	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	212.7	f_c	184.1	1.17(1.16)	O.K.
ブレース	ϕ -355.6×7.9	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	—	f_c	337.2	2.09	O.K.
鋼板	PL-12	Ss900	+NS+EW+UD	σ_x	18.8	f_t	258.0	0.97	O.K.
				σ_y	256.6				
				T_{xy}	19.8				

断面検討結果（一般部，燃料取り出し時）

部位	部材形状 (mm)	地震条件		最大応力度 (N/mm ²)		許容応力度 (N/mm ²)		最大塑性率	判定
				σ_c		f_c			
柱	H-400×400×13×21	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	423.5	f_c	345.1	1.26(1.23)	O.K.
梁	H-800×300×14×26	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	260.5	f_c	184.1	1.50(1.42)	O.K.
ブレース	ϕ -355.6×7.9	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	—	f_c	337.2	2.20	O.K.
鋼板	PL-12	Ss900	+NS+EW+UD	σ_x	17.3	f_t	258.0	0.91	O.K.
				σ_y	239.5				
				T_{xy}	19.5				

エネルギー一定則による塑性率評価

- 一部の一部材の弾性応答値が弾性限界強度をわずかに上回った場合、周辺の弾性応答部材への応力再配分が期待できるため、エネルギー一定則の考え方に基づき相当する塑性率を算定する。

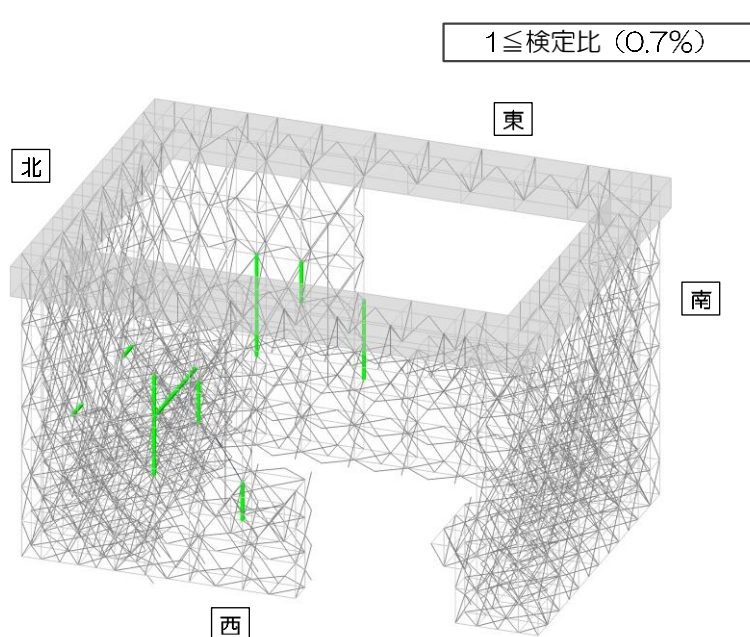


エネルギー一定則を利用して、塑性率を $\varepsilon_3/\varepsilon_1$ （エネルギー一定則を利用した軸ひずみ/許容応力度における軸ひずみ）により算出し、許容値以下となることを確認する。

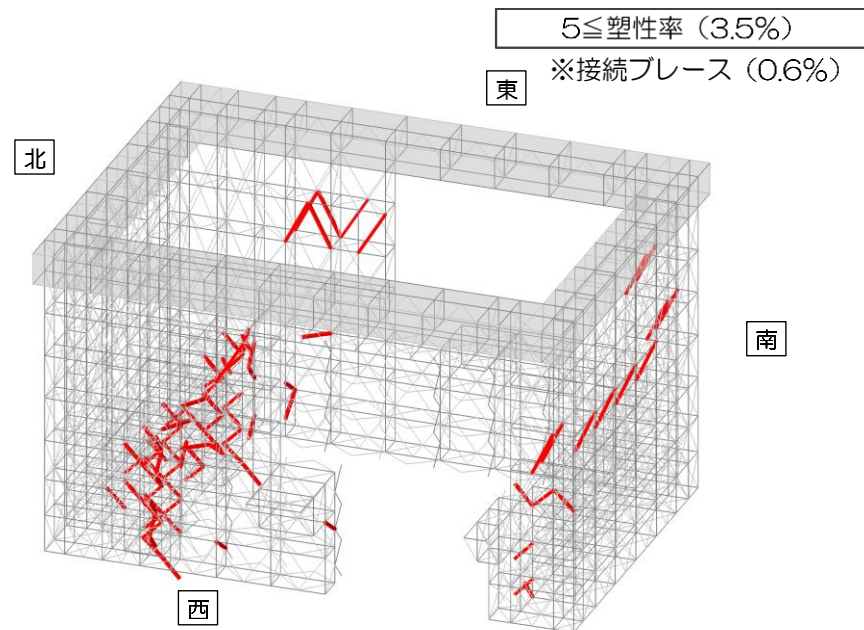
部材の応力-ひずみ関係

エネルギー一定則を利用した結果の妥当性

- 柱及び梁の弾性部材のうち、検定比が1を超える部材は下図に示すとおり、全体の1%程度とごくわずかである。このため、カバー全体の変形に影響を与えるほど柱、梁は塑性化しておらず、カバーの層間変形角に影響を与えるものではない。
- また、塑性化を許容しているブレース材のうち、塑性率が5を超える部材は下図に示すとおり、全体の4%程度である。このため、カバー全体の変形に影響を与えるほど塑性化していない。



柱梁部材検定比1を超える割合図



ブレース材塑性率5を超える割合図

Ss900に対する検討（カバー架構の鉄骨検討結果②）

- 大型カバー架構（一般部）の断面検討結果を下表に示す。
- 水平ブレース及び鉛直ブレースは最大塑性率が20程度と大きいことから、念のため、破断寿命評価を実施し、部材が破断しないことを確認した。

断面検討結果（一般部，ガレキ撤去時）

部位	部材形状 (mm)	地震条件		最大塑性率 (破断寿命評価)	判定
		Ss900	+NS+EW+UD		
接続部ブレース	十字PL (PL-28×210 +2PL-28×91)	Ss900	+NS+EW+UD	19.40 (0.37)	O.K.
下部ブレース	φ-267.4×6.6	Ss900	+NS+EW+UD	15.84 (0.69)	O.K.

断面検討結果（一般部，燃料取り出し時）

部位	部材形状 (mm)	地震条件		最大塑性率 (破断寿命評価)	判定
		Ss900	+NS+EW+UD		
接続部ブレース	十字PL (PL-28×210 +2PL-28×91)	Ss900	+NS+EW+UD	10.64 (0.04)	O.K.
下部ブレース	φ-318.5×6.9	Ss900	+NS+EW+UD	16.57 (0.86)	O.K.

Ss900に対する検討（カバー架構の鉄骨検討結果③）

- 大型カバー架構（燃料取扱設備支持部）の断面検討結果を下表に示す。
- ガレキ撤去時，燃料取り出し時共に，応力度比1.0を超えないことを確認した。

断面検討結果（燃料取扱設備支持部，ガレキ撤去時）

部位	部材形状 (mm) <使用材料>	地震波 (位置)	入力 方向	作用 応力度 (N/mm ²)		許容 応力度 (N/mm ²)		応力 度比	判定
				σ_c		f_c			
柱	H-400×400×13×21	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	51.5	f_c	326.1	0.16	O.K.
梁	H-350×350×12×19	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	102.2	f_c	344.0	0.30	O.K.
接続部 ブレース	十字PL (PL-28×10 +2PL-28×91)	Ss900	+NS+EW+UD	σ_t	240.3	f_t	357.5	0.68	O.K.
下部 ブレース	ϕ -355.6×7.9	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	202.4	f_c	349.6	0.58	O.K.

断面検討結果（燃料取扱設備支持部，燃料取り出し時）

部位	部材形状 (mm) <使用材料>	地震波 (位置)	入力 方向	作用 応力度 (N/mm ²)		許容 応力度 (N/mm ²)		応力 度比	判定
				σ_c		f_c			
柱	H-400×400×13×21	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	89.9	f_c	326.1	0.28	O.K.
梁	H-350×350×12×19	Ss900	+NS+EW+UD	σ_t	135.5	f_t	357.5	0.38	O.K.
接続部 ブレース	十字PL (PL-28×10 +2PL-28×91)	Ss900	+NS+EW+UD	σ_t	246.2	f_t	357.5	0.69	O.K.
下部 ブレース	ϕ -406.4×9.5	Ss900	+NS+EW+UD	σ_c	279.8	f_c	351.3	0.80	O.K.

破断寿命評価方法

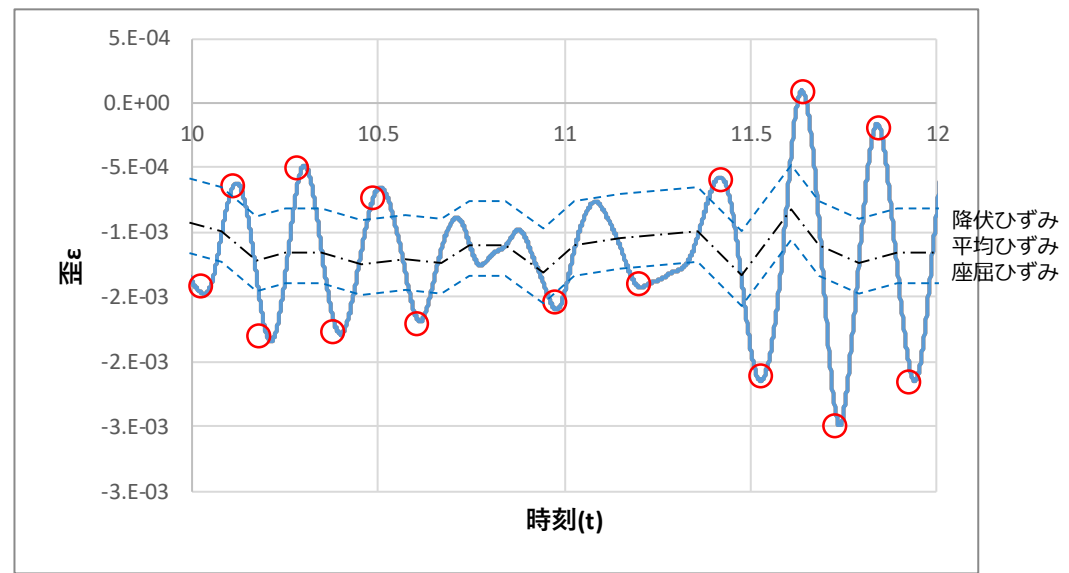
- 対象部材に対して，応答解析より求まる最大等価軸ひずみ（設定歪振幅）を算定する。
- 対象部材の最大等価軸ひずみに対応する鋼材の破断寿命を中込ほか※1より算出し，これを評価基準とする。
- 対象部材の軸ひずみ時刻歴波形より，降伏ひずみ及び座屈ひずみを超え，勾配の正負が切り替わる全点（波形のピーク）を数え上げ，それを繰り返し回数とする。

※1 中込他，繰返し力を受けるSM490鋼の疲労性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第469号，127-136，1995年3月

設定歪振幅と破断寿命※1

設定歪振幅	亀裂発生寿命	破断寿命
10.00%	3	1.8×10
7.00%	1.0×10	3.9×10
5.00%	2.6×10	6.7×10
3.50%	3.5×10	1.02×10^2
2.00%	1.70×10^2	2.99×10^2
1.00%	4.40×10^2	9.66×10^2
0.90%	8.00×10^2	1.29×10^3
0.70%	1.45×10^3	2.76×10^3
0.50%	3.00×10^3	5.77×10^3
0.30%	1.90×10^4	3.29×10^4
0.22%	6.30×10^4	8.64×10^4
0.17%	8.50×10^5	1.19×10^6

繰り返し回数のイメージ



○ 降伏ひずみ及び座屈ひずみを超えた点

破断寿命評価結果

ガレキ撤去時の破断寿命に対する繰り返し回数の算定を示す。

表 破断寿命に対する繰り返し回数の算定 (ガレキ撤去時)

部位 (使用部材)	部材	最大等価 軸ひずみ $\epsilon_{max}(\times 10^{-3})$	応答による 繰り返し回数* ¹ n_i	評価基準* ² (破断寿命) N_p	$\frac{n_i}{N_p}$	判定
接続部ブレース 十字PL-210x28(SN490B)	鉛直ブ レース	1.49	197	544	0.37	OK

*1: 対象部材の軸ひずみ時刻歴波形をカウントする。

*2: 最大等価軸ひずみ (設定ひずみ振幅) に対応する鋼材の破断寿命を引用文献より算定する (参考表)。破断寿命は、参考表の設定ひずみより求める。

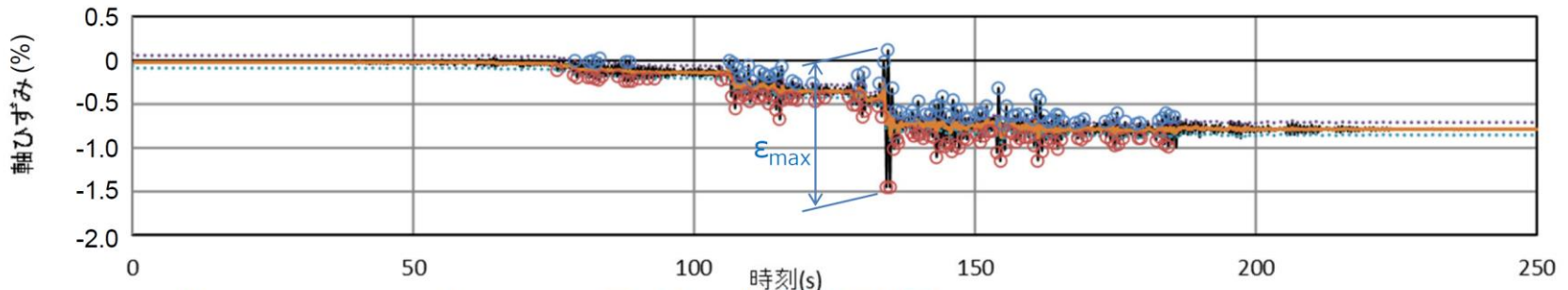


図 軸ひずみ時刻歴波形

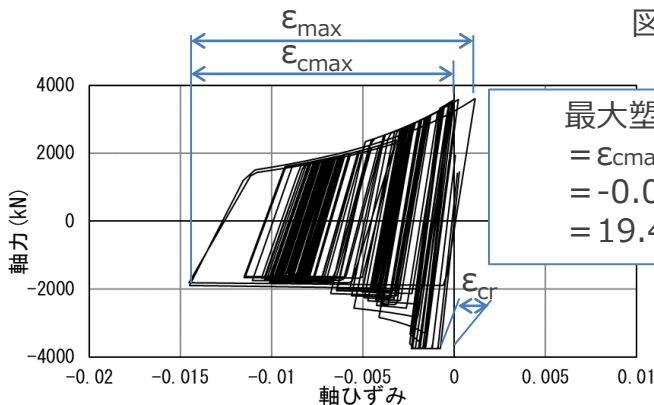


図 軸ひずみ-軸力時刻歴

参考表 設定ひずみ振幅と疲労寿命

設定歪振幅	亀裂発生寿命	破断寿命
10.00%	3	1.8×10^3
7.00%	1.0×10^3	3.9×10^3
5.00%	2.6×10^3	6.7×10^3
3.50%	3.5×10^3	1.02×10^4
2.00%	1.70×10^4	2.99×10^4
1.00%	4.40×10^4	9.66×10^4
0.90%	8.00×10^4	1.29×10^5
0.70%	1.45×10^5	2.76×10^5

Ss900に対する検討（アンカーボルト検討結果①）

- 大型カバー架構のアンカーボルトの終局強度に対する検定比を下表に示す。
- 当初設計からアンカーボルトの本数を増やした上で、ガレキ撤去時及び燃料取り出し時共に、検定比1.0を超えないこと確認した。

アンカーボルト検討結果（一般部，ガレキ撤去時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (16)	Ss900	+NS+EW+UD	1860	2329	3984	3088	0.80	O.K.

アンカーボルト検討結果（一般部，燃料取り出し時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (16)	Ss900	+NS+EW+UD	1802	2350	3984	3088	0.81	O.K.

Ss900に対する検討（アンカーボルト検討結果②）

- 大型カバー架構のアンカーボルトの終局強度に対する検定比を下表に示す。
- 当初設計からアンカーボルトの本数を増やした上で、ガレキ撤去時及び燃料取り出し時共に、検定比1.0を超えないこと確認した。

アンカーボルト検討結果（燃料取扱設備支持部，ガレキ撤去時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (12)	Ss900	+NS+EW+UD	906	1607	4008	2316	0.70	O.K.

アンカーボルト検討結果（燃料取扱設備支持部，燃料取り出し時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (24)	Ss900	+NS+EW+UD	3577	2964	6144	4632	0.76	O.K.

アンカーボルトの検定方法について

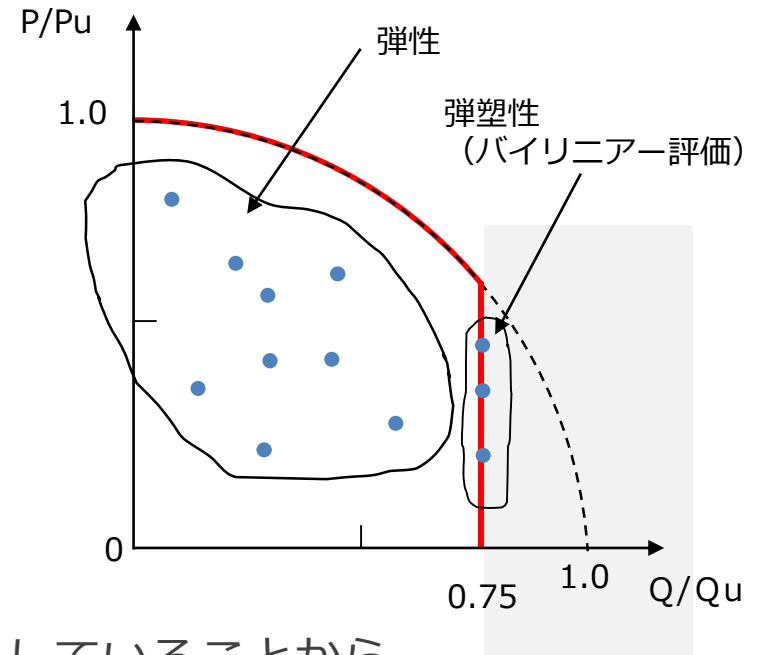
- 引張力, せん断力の組合せ応力に対して、ミーゼスの降伏条件から

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \leq \sigma_y^2$$

$$\Rightarrow \left(\frac{A\sigma}{A\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{A\tau}{A\sigma_y/\sqrt{3}}\right)^2 \leq 1$$

$$\therefore \left(\frac{P}{P_u}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^2 \leq 1$$

- A : アンカーボルトの断面積 (mm²)
- P_u : アンカーボルトの終局引張耐力 (kN)
- Q_u : アンカーボルトの終局せん断耐力 (kN)
- P : アンカーボルトの引張力 (kN)
- Q : アンカーボルトのせん断力 (kN)



せん断終局強度の75%を制限値とした評価としていることから、

$$\frac{Q}{Q_u} \leq 0.75$$

バイリニアール評価した検定値は、上図の $\frac{Q}{Q_u} = 0.75$ の直線上にあり、弾性範囲内の検定値は全て上図の赤線内側の範囲に収まっている。

Ss900に対する検討（屋根部の検討結果）

- 大型カバー架構（屋根部）の断面検討結果を示す。
- 弦材，ブレースは最大塑性率5を超えないことを確認した。
- 斜材は最大塑性率が15程度と大きいことから，念のため，破断寿命評価を実施し，部材が破断しないことを確認した。

断面検討結果（ガレキ撤去時）

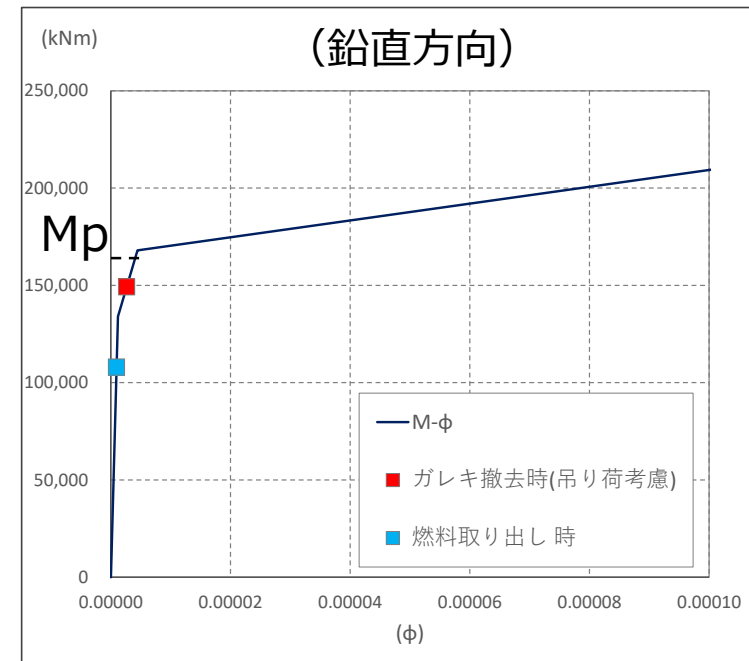
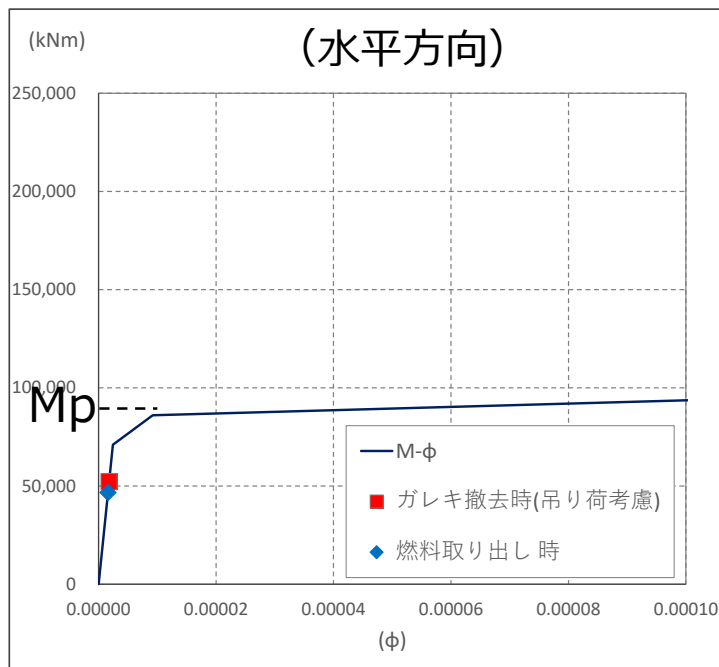
部位	部材形状 (mm)	地震条件		最大塑性率 (破断寿命評価)	判定
		Ss900	+NS+EW+UD		
弦材	P-190.7φ×5.3t	Ss900	+NS+EW+UD	0.80	O.K.
斜材	P-89.1φ×3.2t	Ss900	+NS+EW+UD	15.72 (0.26)	O.K.
ブレース	1-M30	Ss900	+NS+EW+UD	4.12	O.K.

断面検討結果（燃料取り出し時）

部位	部材形状 (mm)	地震条件		最大塑性率 (破断寿命評価)	判定
		Ss900	+NS+EW+UD		
弦材	P-261.3φ×7.0t	Ss900	+NS+EW+UD	0.94	O.K.
斜材	P-89.1φ×3.2t	Ss900	+NS+EW+UD	20.90 (0.39)	O.K.
ブレース	1-M27	Ss900	+NS+EW+UD	4.69	O.K.

Ss900に対する検討（ガレキ撤去用天井クレーンの検討結果①）

- 地震応答解析より得られた東西レール間の最大相対水平変位は，ガレキ撤去時 39mm，燃料取り出し時41mmで，クレーン端部の水平かかり代 2300mm(2.3m)に比べ小さく，ガレキ撤去用天井クレーンが落下する危険性はないことを確認した。
- 地震応答解析より得られたガレキ撤去用天井クレーンガーダの水平方向（NS方向）および鉛直方向の最大応答曲げモーメントを下図に示す。
- ガレキ撤去時，燃料取り出し時共に，クレーンガーダの全塑性曲げモーメント M_p を超える不安定状態には至らないことを確認した。



ガレキ撤去用天井クレーンガーダの最大応答曲げモーメント

Ss900に対する検討（ガレキ撤去用天井クレーンの検討結果②）

- 地震応答解析より得られたクレーンガーダの最大鉛直変位は、ガレキ撤去時174mm、燃料取り出し時**119mm**となり、トロリーの脱落防止材の鉛直かかり代259mmに比べ小さく、脱落防止材は鉛直方向に外れないことを確認した。
- ガレキ撤去用天井クレーンの最大応答水平加速度にトロリー重量（56ton）を乗じ求めた水平力に対し、トロリーの脱落防止材に生じるせん断応力度を求め下表に示す。
- ガレキ撤去時、燃料取り出し時共に、トロリーの脱落防止材に発生する応力は弾性限界強度を超えないことを確認した。

脱落防止材の断面検討結果（ガレキ撤去時）

天井クレーン 最大水平応答加速度 (m/s ²)	トロリー脱落防止材 水平力 (k N)	トロリー脱落防止材 せん断応力度 (N/mm ²)	弾性限界応力度 (N/mm ²)	検定比	判定
45.7	2559	94.8	149	0.64	O.K.

脱落防止材の断面検討結果（燃料取り出し時）

天井クレーン 最大水平応答加速度 (m/s ²)	トロリー脱落防止材 水平力 (k N)	トロリー脱落防止材 せん断応力度 (N/mm ²)	弾性限界応力度 (N/mm ²)	検定比	判定
42.0	2352	87.1	149	0.58	O.K.

Ss900に対する検討（アンカー部の剛性のパラスタ）

- アンカー部の剛性について、アンカー実験の剛性値を初期剛性としたケースについて、パラスタを実施した。
- アンカーボルト部における検定比は下表に示す通りとなり、大型カバーの構造成立性に影響を与えるものではないと考えている。

アンカーボルト検討結果（一般部，ガレキ撤去時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (20)	Ss900	+NS+EW+UD	2726	2895	5880	3860	0.80	O.K.

アンカーボルト検討結果（一般部，燃料取り出し時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (36)	Ss900	+NS+EW+UD	3456	5211	7468	6948	0.80	O.K.

Ss900に対する検討（アンカー部の剛性のパラスタ）

- アンカー部の剛性について、アンカー実験の剛性値を初期剛性としたケースについて、パラスタを実施した。
- アンカーボルト部における検定比は下表に示す通りとなり、大型カバーの構造成立性に影響を与えるものではないと考えている。

アンカーボルト検討結果（燃料取扱設備支持部，ガレキ撤去時）

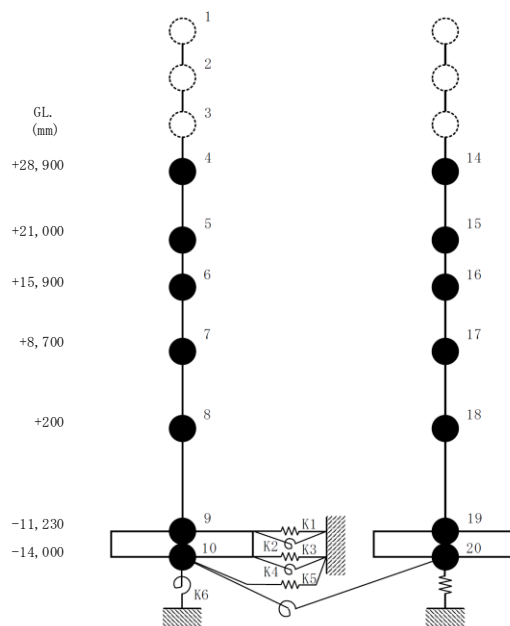
部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (16)	Ss900	+NS+EW+UD	1427	1837	4784	3088	0.60	O.K.

アンカーボルト検討結果（燃料取扱設備支持部，燃料取り出し時）

部位 (アンカー本数)	地震条件		最大反力		終局強度		耐力比	判定
			引張力 (kN)	せん断力 (kN)	引張 (kN)	せん断 (kN)		
アンカーボルト (32)	Ss900	+NS+EW+UD	5988	4094	8576	6176	0.94	O.K.

Ss900に対する検討（原子炉建屋の健全性①）

- 大型カバーを設置したことによって、原子炉建屋の健全性に影響を与えるかどうかの確認を実施する。
- 検討は、大型カバーを設置する前後でのオペフロでの最大応答加速度の比較と大型カバー設置後の原子炉建屋の耐震壁のひずみと許容値との関係を確認する。
- 地震応答解析に用いるモデルは、建屋を質点系とし地盤を等価なばねで評価した建屋－地盤連成系モデルとする。



原子炉建屋の地震応答解析モデル
(水平方向、誘発上下動考慮モデル)

Ss900に対する検討（原子炉建屋の健全性②）

- 大型カバーを設置する前の原子炉建屋の評価は、実施計画の「Ⅱ.2.6 滞留水を貯留している（滞留している場合を含む）建屋 添付資料－2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全評価）」を用いたものとする。
- 大型カバーを設置した後の原子炉建屋の評価は、今回提出した実施計画に記載の数値を用いたものとする。

Ss900に対する検討（原子炉建屋の健全性③）

■ 大型カバー設置前の原子炉建屋の建屋の諸元は下記の通りである。

1号機原子炉建屋の建屋諸元

a) NS方向

質点番号	質点重量 W (kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	—	—
4	58,690	84.43	—	—
5	67,910	97.77	135.0	16,012
6	77,220	111.11	160.8	21,727
7	88,440 [1,240]	127.32 [1.79]	132.8	24,274
8	162,800 (16,780)	234.31 (24.15)	155.6	36,481
9	185,210 (38,140)	266.64 (54.91)	294.0	52,858
10	62,400	89.83	1,914.3	275,530
合計	702,670			

注 ()内は滞留水による付加分を示す。
[]内はカバリング工事による付加分を示す。

ヤング係数 E_c $2.57 \times 10^7 (\text{kN}/\text{m}^2)$
 せん断弾性係数 G $1.07 \times 10^7 (\text{kN}/\text{m}^2)$
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 41.56m(NS方向) × 43.56m(EW方向)

b) EW方向

質点番号	質点重量 W (kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	—	—	—	—
4	58,690	48.34	—	—
5	67,910	55.90	102.7	9,702
6	77,220	63.55	163.9	13,576
7	88,440 [1,240]	127.32 [1.79]	131.6	14,559
8	162,800 (16,780)	234.31 (24.15)	197.8	36,427
9	185,210 (38,140)	327.39 (67.42)	294.0	52,858
10	62,400	110.32	1,914.3	338,428
合計	702,670			

注 ()内は滞留水による付加分を示す。
[]内はカバリング工事による付加分を示す。

ヤング係数 E_c $2.57 \times 10^7 (\text{kN}/\text{m}^2)$
 せん断弾性係数 G $1.07 \times 10^7 (\text{kN}/\text{m}^2)$
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 41.56m(NS方向) × 43.56m(EW方向)

Ss900に対する検討（原子炉建屋の健全性④）

- 大型カバー設置後の原子炉建屋の諸元は下記の通りである。

1号機原子炉建屋の建屋諸元

a) ガレキ撤去時

G.L.(m)	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}^2)$	
		NS方向	EW方向
+28.90	113830	163.75	93.73
+21.00	81500	117.34	67.09
+15.90	90680	130.48	74.63
+8.70	87510	125.98	125.98
+0.20	162800	234.31	234.31
-11.23	185210	266.64	327.39
-14.00	62400	89.83	110.32
合計	783930		

b) 燃料取り出し時

G.L.(m)	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}^2)$	
		NS方向	EW方向
+28.90	161390	232.17	132.90
+21.00	81500	117.34	67.09
+15.90	90670	130.46	74.62
+8.70	88080	126.80	126.80
+0.20	163140	234.80	234.80
-11.23	185210	266.64	327.39
-14.00	62400	89.83	110.32
合計	832390		

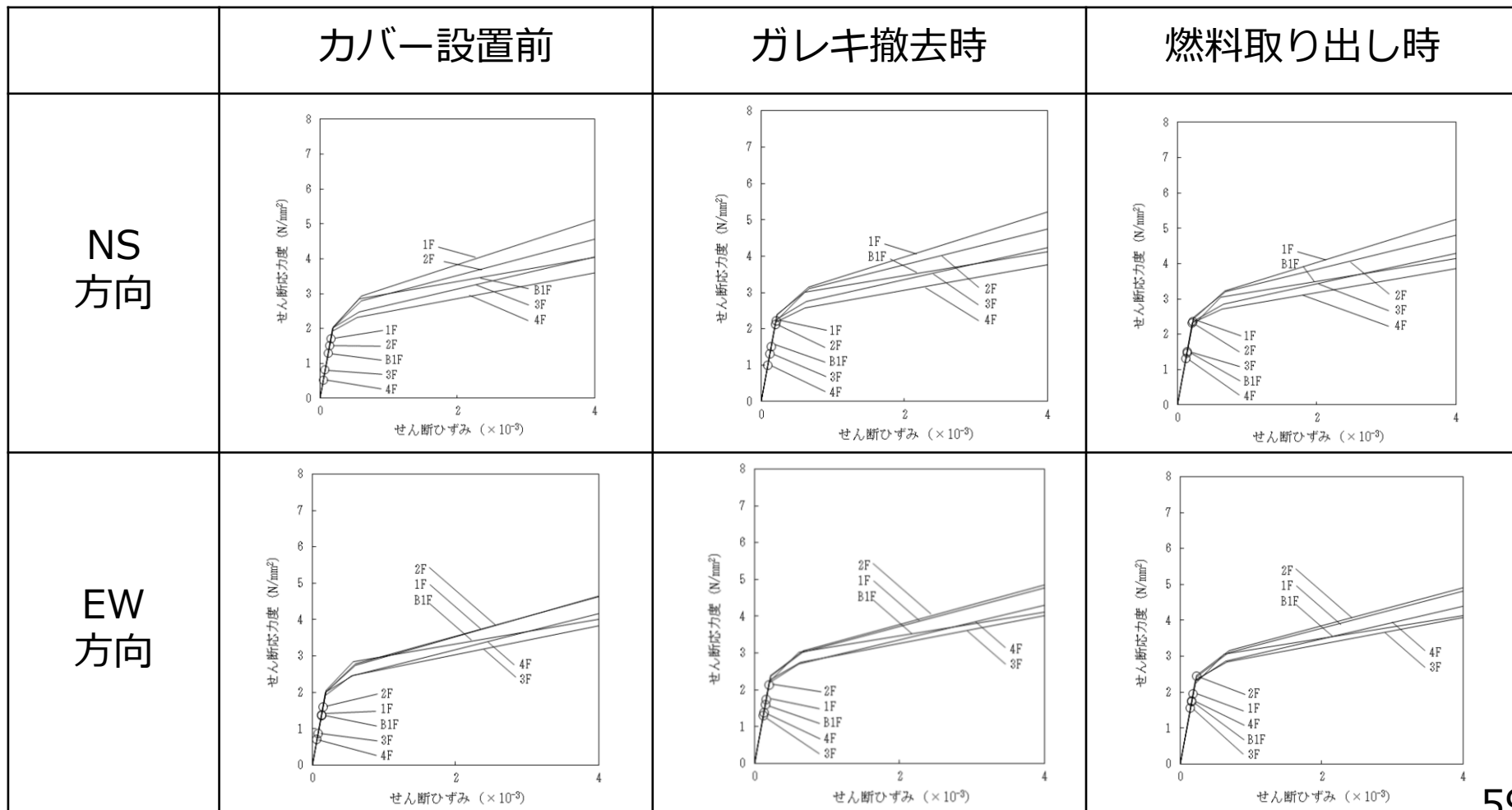
- 地盤モデルを下表に示す。

地盤定数

G.L. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位 体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン 比 ν	せん断 弾性係数 G ($\times 10^5$ kN/m ²)	初期せん断 弾性係数 G ₀ ($\times 10^5$ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀	ヤング 係数 E ($\times 10^5$ kN/m ²)	減衰 定数 h (%)	層厚 H (m)
0.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.04	2.62	0.85	6.01	4	8.1
-8.1	泥岩	450	16.5	0.464	2.32	3.41	0.78	6.79	3	11.9
-20.0		500	17.1	0.455	2.96	4.36	0.78	8.61	3	70.0
-90.0		560	17.6	0.446	3.83	5.63	0.78	11.08	3	28.0
-118.0		600	17.8	0.442	4.44	6.53	0.78	12.80	3	88.0
-206.0		(解放基盤)	700	18.5	0.421	9.24	9.24	1.00	26.26	-

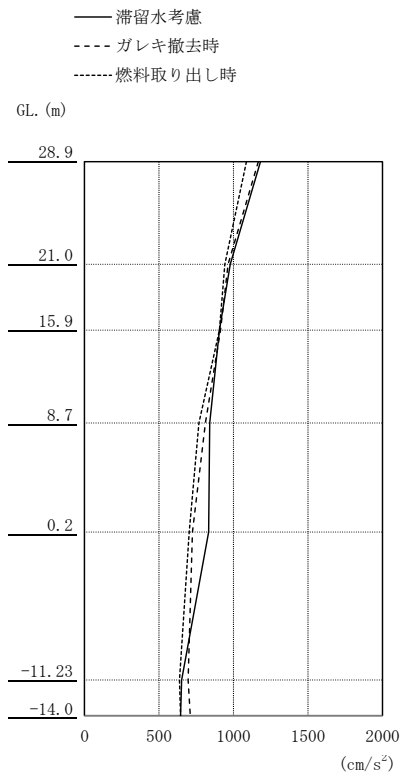
Ss900に対する検討（原子炉建屋の健全性⑥）

- 大型カバー設置後のSs900に対する最大応答値を、「JEAG4601-1991」に基づき設定した耐震壁のせん断スケルトン曲線上にプロットした結果を示す。
- 検討の結果，地震応答解析により得られる最大応答値は，評価基準値（ 4.0×10^{-3} ）以下となり，クライテリアを満足することを確認した。

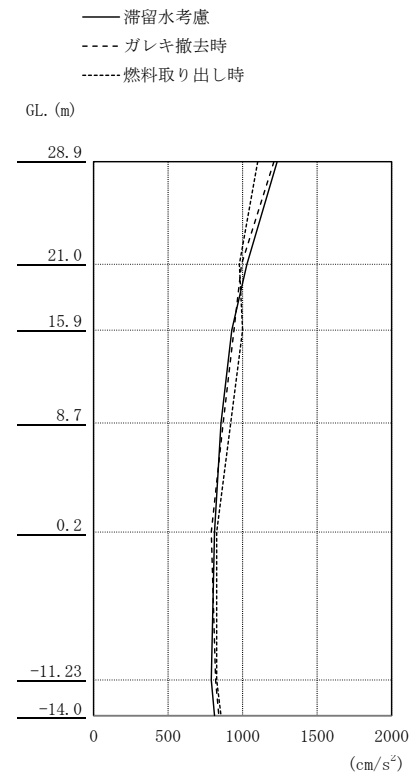


Ss900に対する検討（原子炉建屋の健全性⑦）

- カバー設置前とカバー設置後のガレキ撤去時及び燃料取り出し時の最大応答加速速度の比較を下図に示す。
- 各階の最大応答加速速度は大きな違いが見られず、カバーを設置した影響は小さい。



a) NS方向



b) EW方向

最大応答加速速度の比較