

大型廃棄物保管庫の使用済吸着塔保管架台 耐震評価（Ss900）について

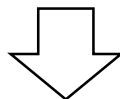
2022年9月29日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

保管架台の耐震評価（概要）

- ・保管する使用済吸着塔はインベントリが大きく、「地震により安全機能を失った際の公衆への被ばく影響」を考慮すると、大型廃棄物保管庫は耐震Sクラスとなる。
- ・保管架台は、インベントリが大きい使用済吸着塔を格納する支持構造物である。
- ・地震時において、保管架台の破損により使用済吸着塔の間接支持機能が失われる可能性がある。



保管架台の耐震評価では、Ss900にて使用済吸着塔の間接支持機能を失わないことを確認する

保管架台の耐震設計方針

➤ 既認可での耐震設計について

使用済吸着塔を格納するための保管架台については、2015年に従来の保管架台（6×1列を3基連結した架台）が認可されており、保管架台は床版に基礎ボルトで固定され、格納する使用済吸着塔は、保管架台の受け梁上に遠隔操作式クレーンにて静置するもの（フリースタANDING）としている。これは、屋外保管を想定し、使用済吸着塔底面が雨水等の影響により腐食することを防止すること、また、格納する使用済吸着塔の表面線量が高線量になり得ると想定し、保管架台や床版へ固定する際の近接作業による過剰な被ばくを防止することを目的としたもので、汚染水処理設備導入当初からの設計を踏襲したものである。

既認可では、保管架台に対し静的地震力により転倒並びに滑動評価を実施していた。

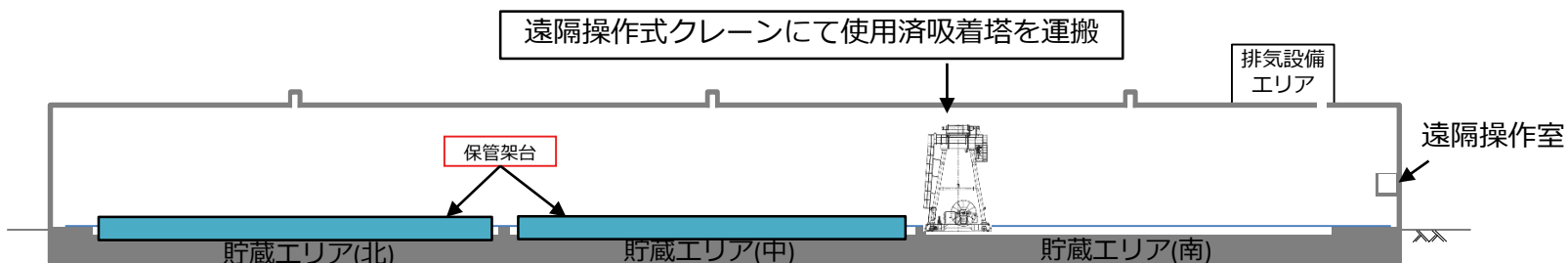
➤ 今回の耐震設計方針について

格納する使用済吸着塔の安全機能が喪失した場合における敷地境界への線量影響を踏まえると、使用済吸着塔を支持する保管架台については、地震時においてもその破損を防止するため、間接支持機能を維持する設計である必要がある。そのため、保管架台は床版に基礎ボルトで固定する構造とし、十分な強度を有することとするが、格納する使用済吸着塔については、既認可の保管架台と同様、固定を行う際の近接作業による過剰な被ばくを防止するため、床版に静置すること（フリースタANDING）とした。

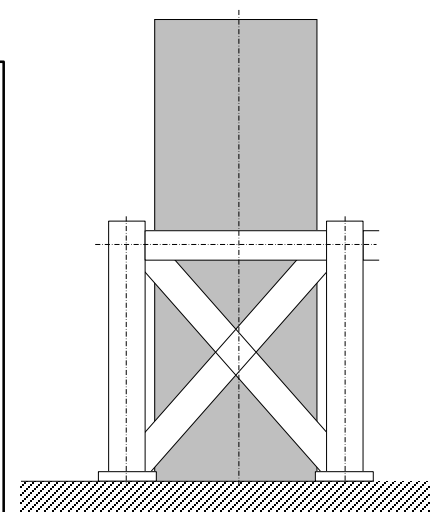
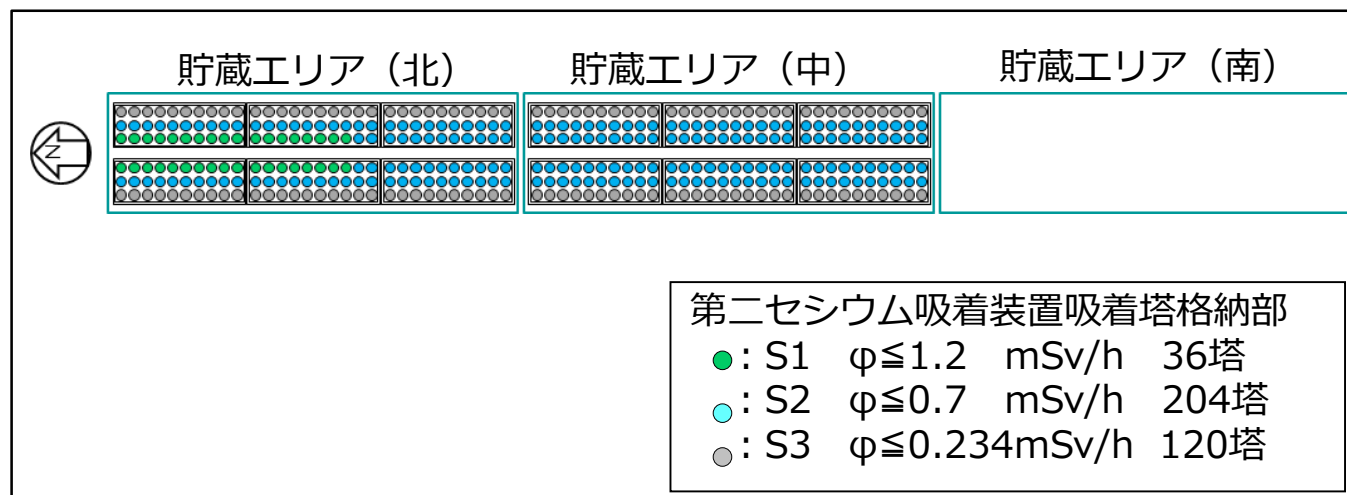
上記の構造とすることにより、地震時においても、保管架台が間接支持機能を維持することを確認する他、使用済吸着塔の滑動によって、保管架台と接触した場合においても、十分な強度を有することを確認する。

保管架台への使用済吸着塔の格納について

- 使用済吸着塔は、大型廃棄物保管庫内に設置する保管架台内に格納する。
- 保管架台内への使用済吸着塔の格納は、遠隔操作式クレーンにて行う。
- 作業員の被ばくを防ぐため、使用済吸着塔の固定は行わず床版に静置するものとする。



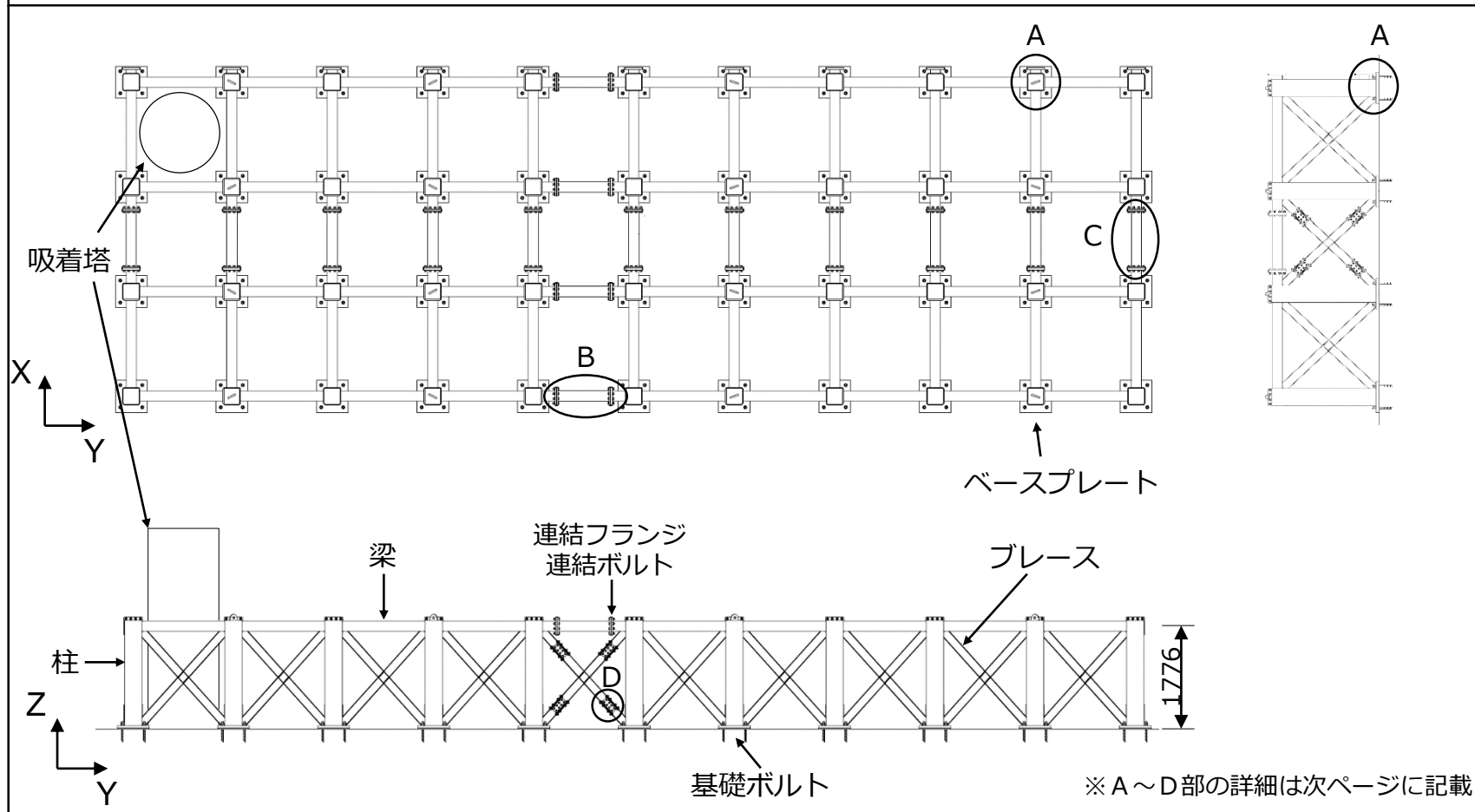
【大型廃棄物保管庫の使用済吸着塔格納配置計画】



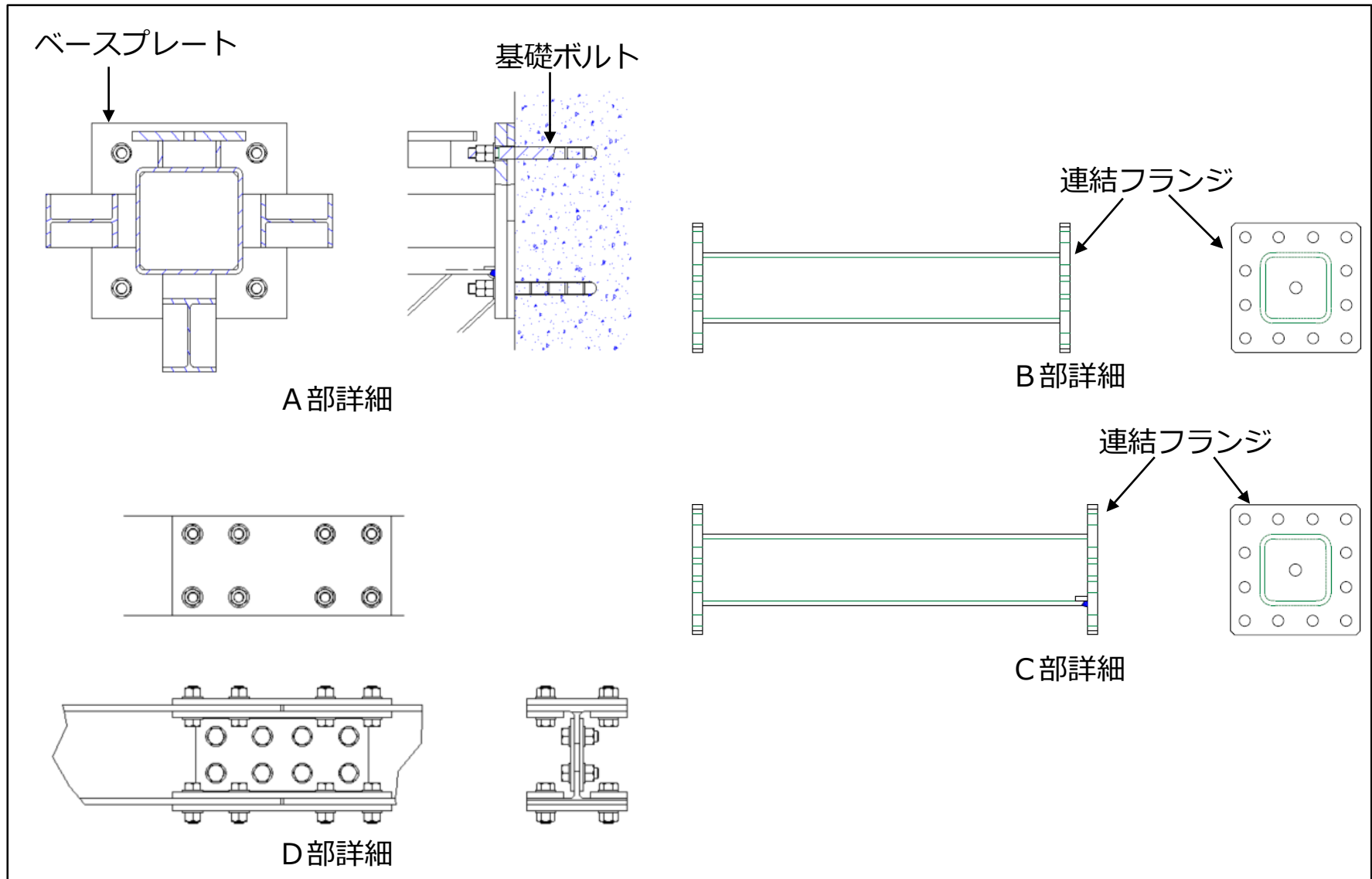
保管架台イメージ図

保管架台の耐震評価（構造概要）

- ・ 保管架台をベースプレートで支持し、各ベースプレートに4本設置されている基礎ボルトで床版に据え付ける構造とする。
- ・ 保管架台本体として梁及び柱は角型鋼管とし、ブレースはH形鋼を使用する。
- ・ 格納する使用済吸着塔は保管架台に積載しない設計とする。
- ・ 柱間全てにブレースを設けており、使用済吸着塔が梁の下から滑り出ない構造とする。



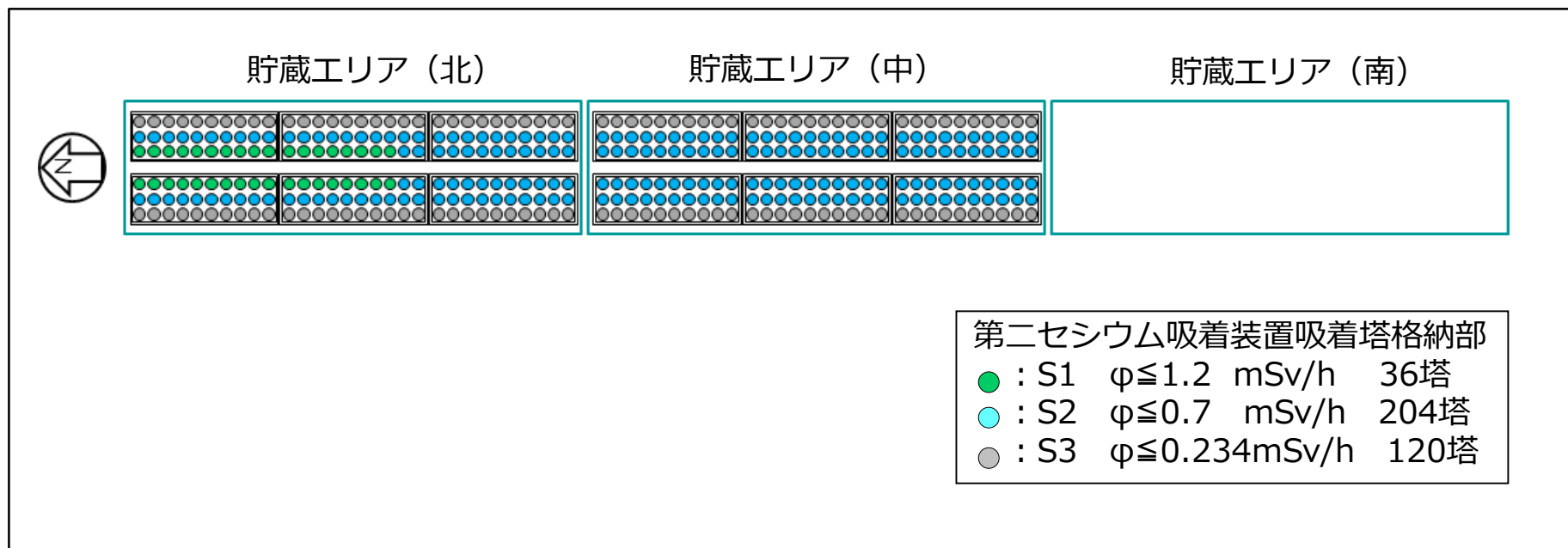
保管架台の耐震評価（構造概要）



保管架台の耐震評価（配置概要）

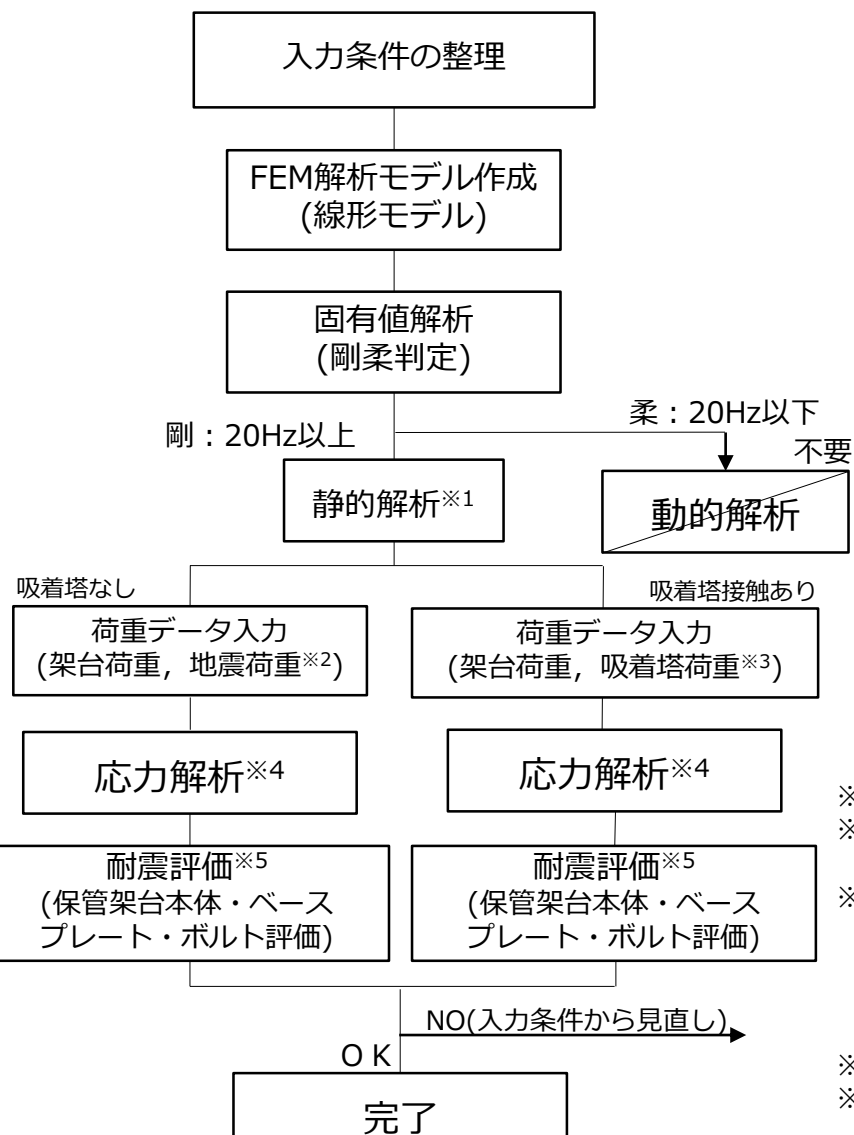
- ・ 保管架台は、大型廃棄物保管庫内の貯蔵エリア(北)(中)に設置する。
- ・ 3×10 を1基としており、貯蔵エリア(北)(中)のそれぞれに6基ずつ設置する。
- ・ 1基ずつはそれぞれ独立した構造物である。

配置概要図



保管架台の耐震評価フロー

■ 保管架台 耐震クラス：B+クラス（Ss900による影響評価含む）



- ※1 保管架台の1次固有振動数が剛構造(135Hz)であることから静的解析で実施。
 ※2 地震荷重は、時刻歴床応答加速度の最大値を1.2倍し、建屋の耐震補強による影響を考慮した裕度を持たせる
 ※3 保管架台の耐力評価(地震により使用済吸着塔全数が同一方向に一齐に保管架台と接触した際の評価)を実施する場合は、集中荷重として使用済吸着塔荷重を梁へ入力する。
 $\text{使用済吸着塔荷重} = \text{使用済吸着塔質量} \times \text{地震加速度(上記※2で算出した数値)}$
 摩擦係数=0
 ※4 計算機コード (Nastran) を使用し、XYZ各方向毎に静的線形解析を実施。
 ※5 解析により算出された荷重をSRSS法にて組み合わせて評価を実施。

保管架台の材料物性および断面特性

保管架台を構成する部材の材料物性ならびに断面特性を以下に示す。
 なお、基礎ボルト及び連結ボルトについてはモデル化しない。

材料物性

部位	部材	材質	縦弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比	降伏点 (Sy) [N/mm ²]	引張強さ (Su) [N/mm ²]
柱	□300×300×12	BCR295※3	200933※1	0.3※2	295	400
梁	□175×175×12	BCR295※3	200933※1	0.3※2	295	400
ブレース	H150×150×7×10	SN400B※4	200933※1	0.3※2	235	400
連結フランジ	□320×320×25	SN400B※4	200933※1	0.3※2	235	400
ベースプレート	□550×550×36	SN490C※4	200933※1	0.3※2	325	490
基礎ボルト	M30	SD345※5	200933※1	0.3※2	345	490
連結ボルト	M24	SCM435※1	202933※1	0.3※2	774	918

※1 JSME 発電用原子力設備規格 材料規格 2012年版

※2 鋼構造設計規準

※3 日本鉄鋼連盟 製品規定 建築構造用冷間口ール成形角形鋼管 BCR295

※4 日本規格学会 JISハンドブック2012 鉄鋼Ⅱ G3136

※5 日本規格学会 JISハンドブック2020 鉄鋼Ⅱ G3112

保管架台の材料物性および断面特性

断面特性

断面形状	断面積 [mm ²]	断面 2 次モーメント [mm ⁴]		断面係数 [mm ³]	
		I _y	I _z	Z _y	Z _z
□300×300×12※1	13330	1.81×10 ⁸	1.81×10 ⁸	1.20×10 ⁶	1.20×10 ⁶
□175×175×12※1	7330	3.12×10 ⁷	3.12×10 ⁷	3.56×10 ⁵	3.56×10 ⁵
H150×150×7×10※2	3965	5.63×10 ⁶	1.62×10 ⁷	7.51×10 ⁴	2.16×10 ⁵

※1 日本鉄鋼連盟 製品規定 建築構造用冷間ロール成型角形鋼管 BCR295

※2 日本規格学会 JISハンドブック2021 鉄鋼Ⅱ G3192

使用するボルトの緒元

名称	型式	有効断面積 [mm ²]
基礎ボルト※3	M30	561
連結ボルト※3	M24	353

※3 日本規格協会 JISハンドブック2009 ねじⅠ B1082

保管架台の耐震評価（許容応力）

許容応力は J E A G 4 6 0 1 に基づき下記の評価条件を設定。

許容応力

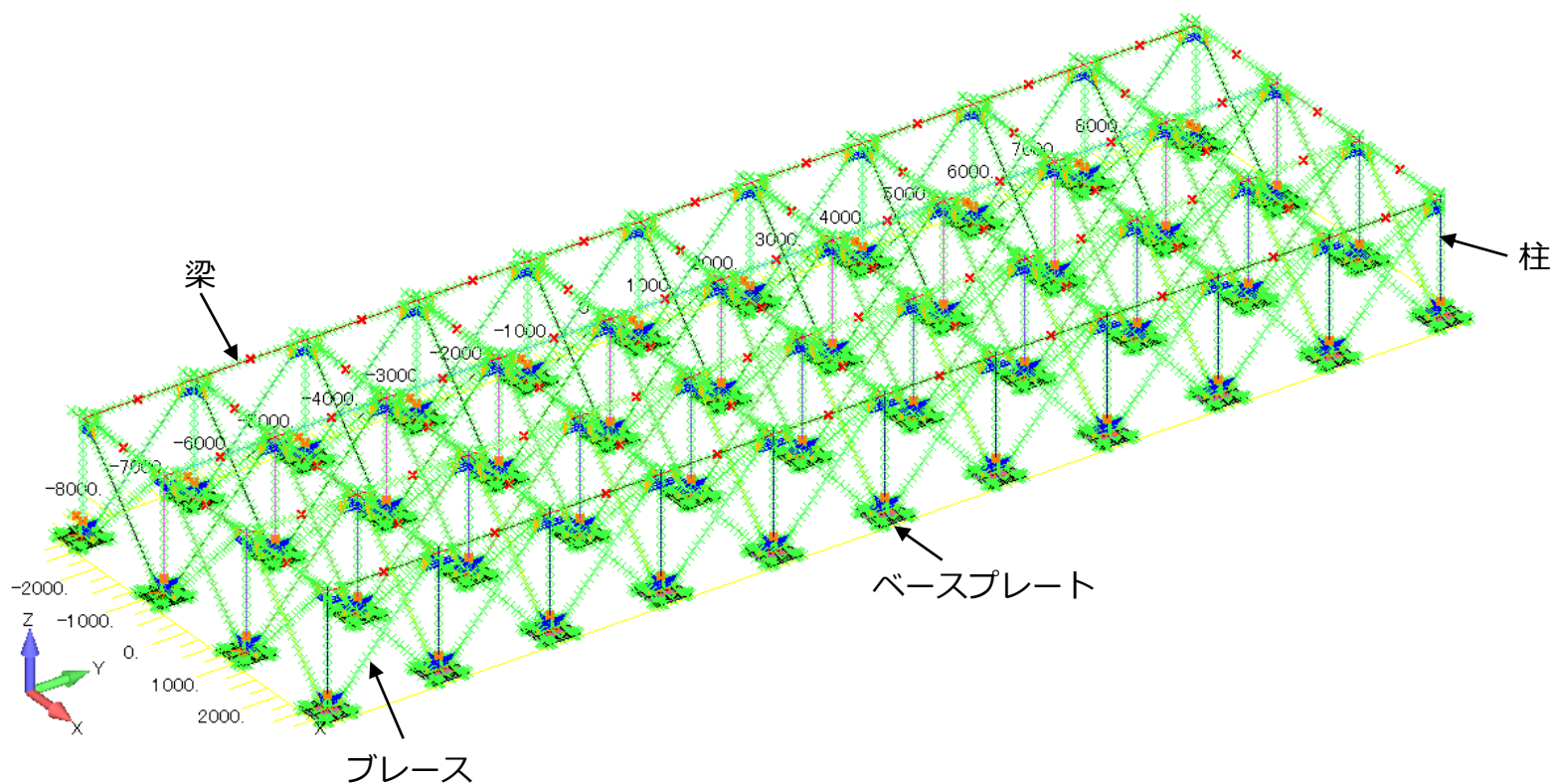
応力分類 供用状態	許容応力（ボルト等以外）*				許容応力（ボルト等）*	
	一次応力				一次応力	
	引張	せん断	圧縮	曲げ	引張	せん断
C _s	1.5・ft	1.5・fs	1.5・fc	1.5・fb	1.5・ft	1.5・fs

注記 *：応力の組合せが考えられる場合は、組合せ応力に対しても評価を行う。

本評価では、保管架台の破損による、使用済吸着塔への波及的影響の有無を確認するため、許容値算定に用いる基準強度（F値）については、設計引張強さ（Su）とする。

保管架台の耐震評価解析モデル

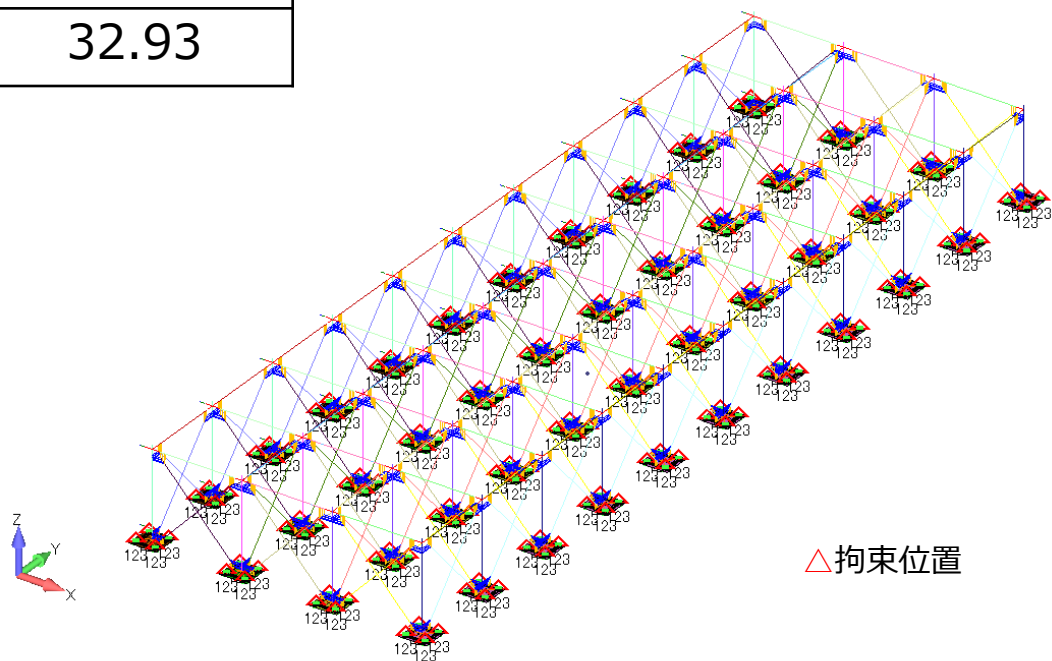
- 解析モデルは、保管架台のみ固有値解析を実施することを目的としてモデル化。
- 保管架台の鋼材は、断面形状に基づき断面特性を設定したはり要素でモデル化。
- 床版に固定するベースプレートは板要素でモデル化するが、基礎ボルト及び保管架台同士を連結する連結ボルトはモデル化しない。



保管架台の耐震評価（固有値解析条件）

- ▶ 保管架台の質量として、保管架台本体を考慮するものとし、使用済吸着塔は床版に静置することから考慮しない。
- ▶ 拘束条件として、保管架台の基礎ボルト取付位置の自由度を3方向拘束とする。

名称	合計質量 (ton)
使用済吸着塔保管架台	32.93



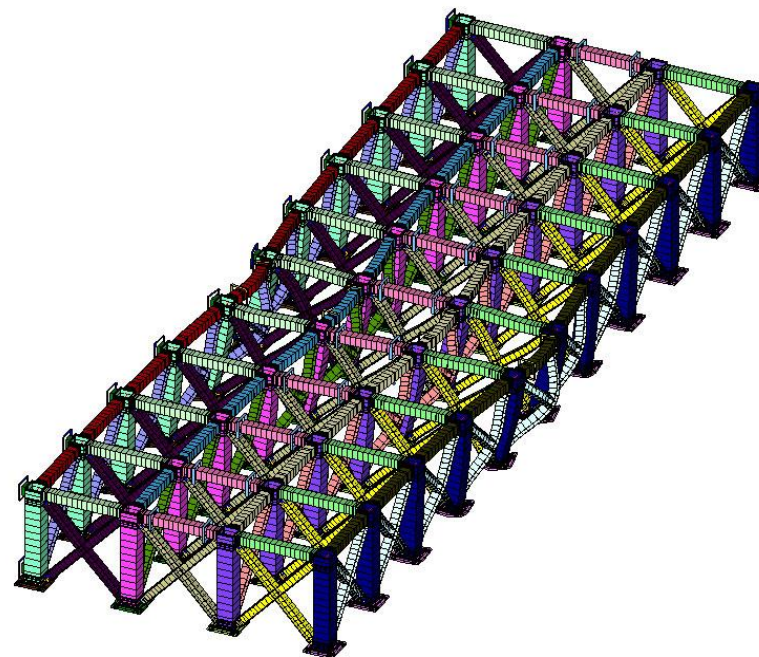
拘束位置図

保管架台の耐震評価（固有値解析結果）

- 固有値解析結果を以下に示す。解析の結果、1次固有振動数が20Hz以上であり、剛構造であることを確認した。

固有値解析結果

次数	固有振動数 [Hz]	固有周期 [s]
1	135.7	0.0074



1次固有振動モード図 全体水平1次

保管架台の耐震評価（計算に用いる地震動）

- 保管架台の評価では、1次固有振動数が20Hz以上となることから、静的震度にて評価を行う。
- 静的震度は、建屋補強前のSs900床応答時刻歴加速度からの最大加速度抽出し、1.2ZPAの1.2倍（建屋の耐震補強による影響を考慮した裕度）した値を使用する。

【計算に用いる地震加速度】

水平震度：1.45 [G]

鉛直震度：0.98 [G]

Ss900-1		
NS	EW	UD
<p>最大加速度：985.092[cm/sec²]</p>	<p>最大加速度：950.733[cm/sec²]</p>	<p>最大加速度：661.707[cm/sec²]</p>

保管架台の耐震評価（応力の評価方法）

J S M E S NC-1に基づき許容応力を算定

部位	使用材料	応力の種類	許容応力 (MPa)
保管架台本体	BCR295 SN400B	引張	400
		せん断	230
		圧縮※	366
		曲げ※	392
		組合せ (引張+曲げ)	$\frac{\sigma_t + {}_t\sigma_b}{1.5f_t} \leq 1$ かつ $\frac{{}_c\sigma_b - \sigma_t}{1.5f_b} \leq 1$
		組合せ (圧縮+曲げ)	$\frac{\sigma_c}{1.5f_c} + \frac{{}_c\sigma_b}{1.5f_b} \leq 1$ かつ $\frac{{}_t\sigma_b - \sigma_c}{1.5f_t} \leq 1$
ベースプレート	SN490C	引張	490
連結ボルト	SCM435	引張	918
		せん断	530
基礎ボルト	SD345	引張	490
		せん断	282

※解析結果にて最大応力発生部位となった箇所の許容応力のみ記載

f_c : 許容圧縮応力, f_b : 許容曲げ応力, f_t : 許容引張応力
 σ_c : 圧縮応力, σ_t : 引張応力, ${}_c\sigma_b$: 圧縮曲げ応力, ${}_t\sigma_b$: 引張曲げ応力

保管架台の耐震評価（構造強度に対する検討）

- 地震応答解析により、計算モデル(12スライド)における部材応力最大位置から得られる応力が、許容応力の範囲内であることを確認することで強度評価を行う。
- 15スライドに示す加速度を用いて解析を行い、解析結果から得られた部材応力最大位置ごとの応力値を比較し、最も厳しい部位について評価を行う。
- 解析手法は、保管架台の1次固有振動数が20Hz以上であり剛構造であることから、静的線形解析にて行う。
- 部材の応力評価として、水平2方向と鉛直方向それぞれに解析を行い、次式に示すSRSS法と自重による応力の絶対値との和により応力値を計算する。

$$\sigma = |\text{自重による応力}| + \sqrt{\left(\begin{array}{c} \text{水平(NS)方向} \\ \text{地震荷重の応力} \end{array} \right)^2 + \left(\begin{array}{c} \text{水平(EW)方向} \\ \text{地震荷重の応力} \end{array} \right)^2 + \left(\begin{array}{c} \text{鉛直方向} \\ \text{地震荷重の応力} \end{array} \right)^2}$$

【応力計算式】

引張応力 : $\sigma_t = N/A$

せん断応力 : $\tau = Q/As$

曲げ応力 : $\sigma_b = M/Z$

圧縮応力 : $\sigma_c = N/A$

A : 断面積

As : せん断断面積

M : 曲げモーメント

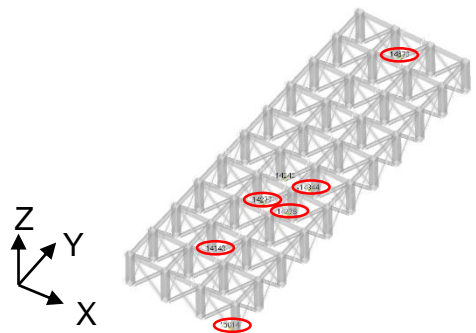
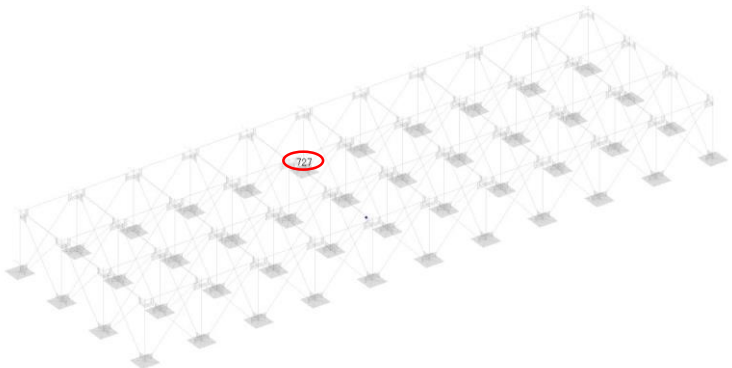
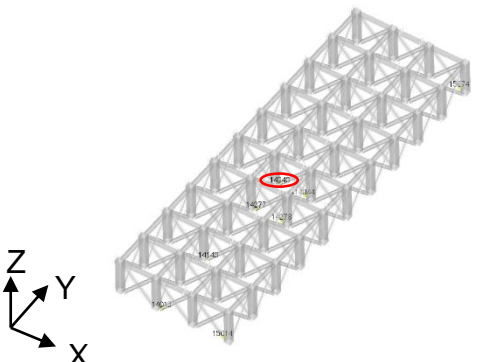
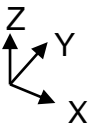
N : 軸力

Q : せん断応力

Z : 断面係数

保管架台の耐震評価（解析結果）

▶ 部材応力最大位置

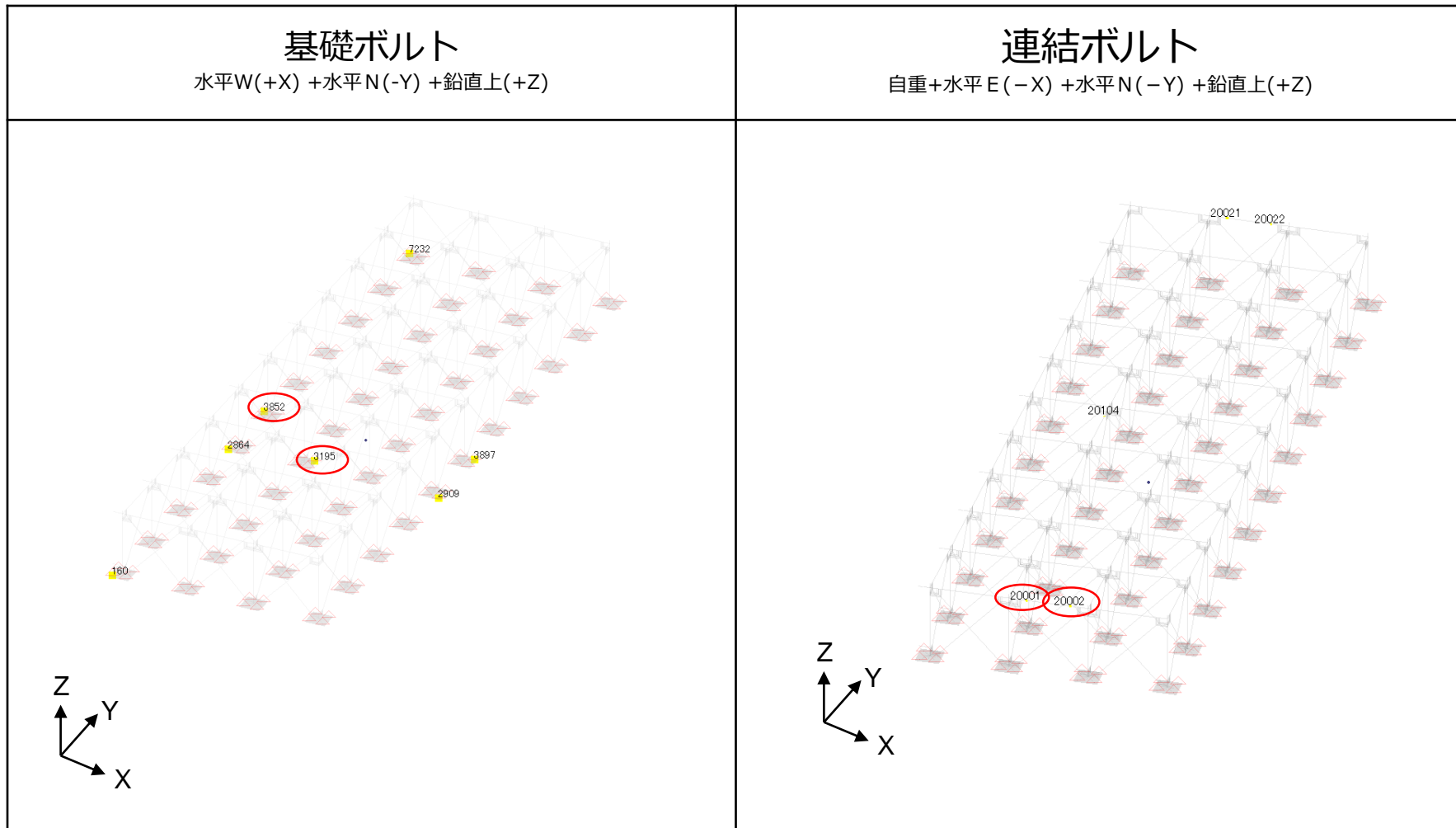
保管架台本体	ベースプレート
自重+水平E(-X) +水平S(+Y) +鉛直上(+Z)	水平W(+X) +水平S(+Y) +鉛直上(+Z)
	
自重+水平E(-X) +水平S(+Y) +鉛直下(-Z)	
	

※方位として、(+X)は西(W), (+Y)は南(S)を示す。

※図に記載の数字は接点番号を示す。

保管架台の耐震評価（解析結果）

➤ 部材応力最大位置



※方位として、(+X)は西(W)、(+Y)は南(S)を示す。

※図に記載の数字は接点番号を示す。

保管架台の耐震評価（評価結果）

保管架台本体・ベースプレートの評価結果

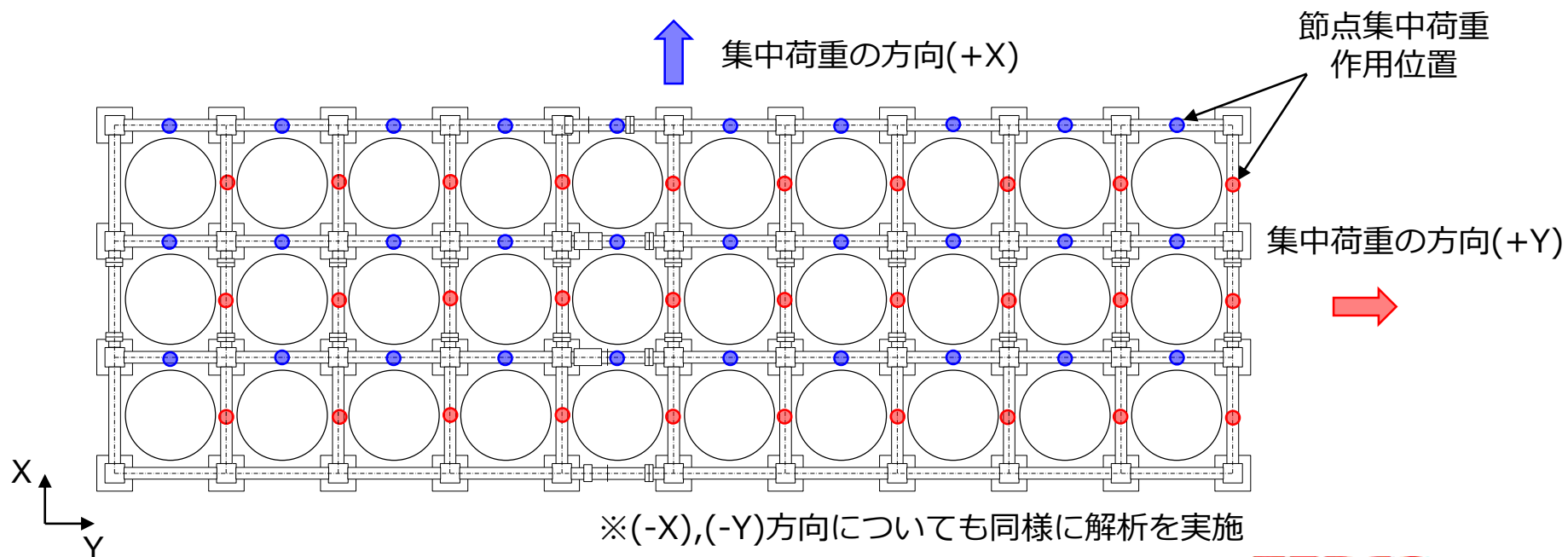
対象	評価項目	評価部位	算出値（最大値）	許容応力	単位
保管架台本体	引張	ブレース	1.59	400	MPa
	せん断	ブレース	1.69	230	MPa
	圧縮	ブレース	1.82	366	MPa
	曲げ	ブレース	2.21	392	MPa
	評価項目	評価部位	算出値	許容値	単位
	組合せ (引張+曲げ)	ブレース	0.01	1.0	-
		ブレース	0.01	1.0	-
	組合せ (圧縮+曲げ)	ブレース	0.01	1.0	-
ブレース		0.01	1.0	-	
対象	評価項目	評価部位	算出値（最大値）	許容応力	単位
ベースプレート	組合せ	-	8.50	490	MPa

基礎ボルト・連結ボルトの評価結果

対象	評価項目	算出値（最大値）	許容応力	単位
基礎ボルト	引張	7.15	490	MPa
	せん断	8.37	282	MPa
連結ボルト	引張	0.23	918	MPa
	せん断	0.34	530	MPa

保管架台の耐力評価（評価条件）

- 地震加速度を使用する解析の他，使用済吸着塔が保管架台に接触した際の影響を確認するため，使用済吸着塔の種類と重心高さを考慮し，最も厳しい条件の節点集中荷重を梁の中央へ作用させる解析を行う。
- 保管架台への保管が想定される使用済吸着塔のうち，質量及び重心高さが最も厳しい高性能多核種除去設備吸着塔（ステンレス製）が，30基保管されている状態で一斉に梁に接触する条件とする。
- 水平2方向それぞれに静的線形解析を行い，解析結果から得られた部材応力最大位置ごとの応力値を比較し，最も厳しい部位について評価を行う。
- 使用済吸着塔底面と床版との接地面は摩擦係数0として評価する。



保管架台の耐力評価（評価条件）

使用済吸着塔と保管架台の接触に対する評価にあたっては、地震時における使用済吸着塔の滑りあるいは転倒挙動を把握する必要があるが、環境条件（吸着塔底面の錆、床面の状況（結露の発生等）等）によって床版との摩擦係数が変わってくるため、一概に挙動を示すことは難しい。

上記理由から、使用済吸着塔が保管架台横梁に接触することを模擬するため、水平方向加速度（1.45G）を使用済吸着塔へ入力した際に発生する荷重を保管架台横梁に集中荷重として作用させるものとする。

（解析原理としては、静置された使用済吸着塔と床版との摩擦係数を保守的に0とするため、地面が揺れた場合でも使用済吸着塔は滑って動かず、床版に固定された保管架台が使用済吸着塔へ接触していく原理となるが、今回のモデルは前述の事象に等置であると考え。）

なお、集中荷重が作用するのは、接触時の一瞬のみである（吸着塔の重心位置と梁高さの関係性から乗り上げることは考えにくい。）ことから、保管架台の固有値には影響は与えないものとする。

(参考) 保管架台と使用済吸着塔の相互作用について

- ▶ 大型廃棄物保管庫に設置する保管架台については、一時保管施設で使用されている保管架台と構造が異なり、使用済吸着塔を床版に直置きする構造としている。また、使用済吸着塔は、保管架台に固定されていないため、仮に使用済吸着塔保管位置を梁との接する位置にした場合でも、使用済吸着塔の自重が保管架台に作用しないため、解析モデルでは、使用済吸着塔の質量は付与しないものとしている。
- ▶ 使用済吸着塔と梁の接触時、接触位置を中心に使用済吸着塔が回転することによって梁に乗り上げることも考えられるが、使用済吸着塔の重心位置と保管架台梁の位置関係は、保管が想定される使用済吸着塔すべての重心位置より高い位置に保管架台の梁高さを設定している。
- ▶ 保管架台耐力評価モデルについては、使用済吸着塔が固定されていないため、滑動により保管架台の梁に接触するが、保管架台単体が剛であること、また接触は瞬間的なものであることから、保管架台の固有値には影響を与えないものとする。
※ポンプ等のインパクトハンマーを使用した打撃試験による固有振動数測定においては、インパクトハンマーの質量は考慮しないため、これと同じ考えである。



- ▶ よって、今回実施している保管架台耐力評価における使用済吸着塔と保管架台の相互作用として、解析モデルを用いた評価は、水平加速度を作用させた使用済吸着塔の外力は考慮するものの、固有値解析上は連成しないものであるため、保管架台の固有値解析上は、使用済吸着塔の質量（外力）を考慮しないものとしている。

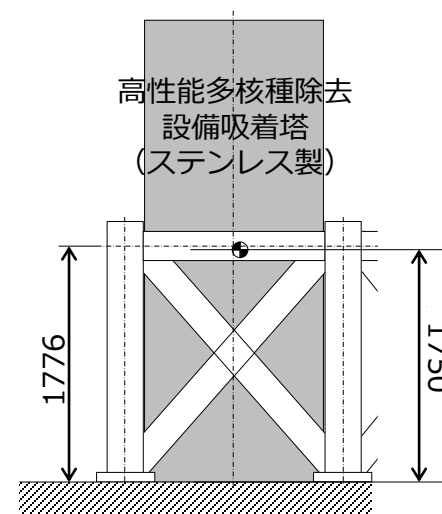
保管架台の耐力評価（評価条件）

吸着塔の種類	重心 [mm]	質量 [ton]	梁の中心高さ [mm]	地震 加速度 [G]	集中 加重 [N]
高性能多核種除去 設備吸着塔 (ステンレス製)	1750	28.5	1776	1.45	405259.81

- 保管架台の梁は1本のため、使用済吸着塔が地震時に接触するのはその梁のみとなる。
よって、使用済吸着塔の質量に地震加速度1.45[G]が掛かった際、梁に掛かる力Pは、

$$P = 28.5 \times 9806.65 \times 1.45 = 405259.81 \text{ [N]}$$

となる。



保管架台の耐力評価（応力の評価方法）

11スライドに示す許容応力算定式に基づき算定

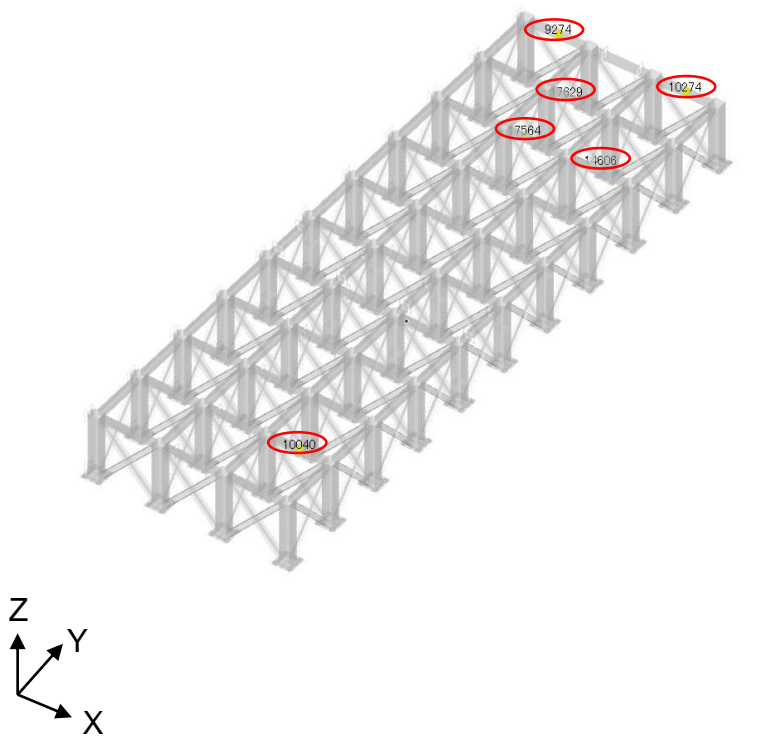
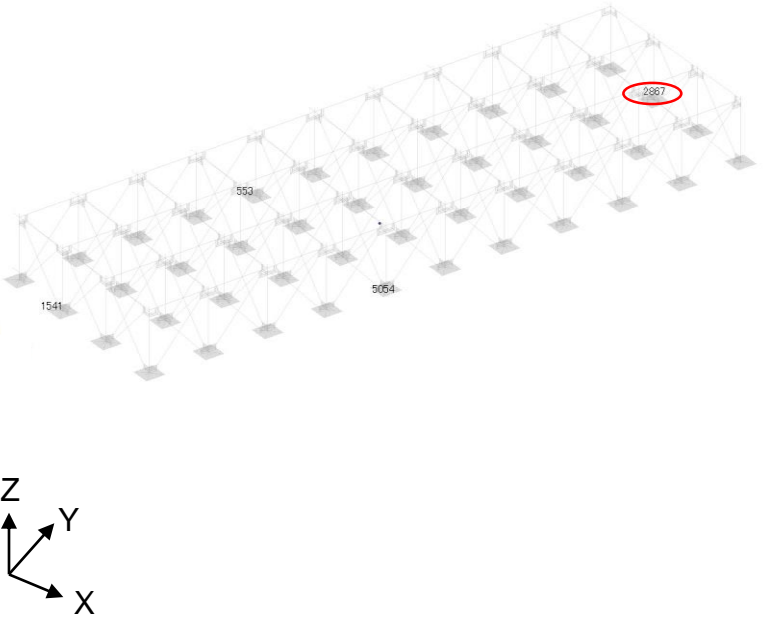
部位	使用材料	応力の種類	許容応力 (MPa)
保管架台本体	BCR295 SN400B	引張	400
		せん断	230
		圧縮※	369
		曲げ※	400
		組合せ (引張+曲げ)	$\frac{\sigma_t + {}_t\sigma_b}{1.5f_t} \leq 1$ かつ $\frac{{}_c\sigma_b - \sigma_t}{1.5f_b} \leq 1$
		組合せ (圧縮+曲げ)	$\frac{\sigma_c}{1.5f_c} + \frac{{}_c\sigma_b}{1.5f_b} \leq 1$ かつ $\frac{{}_t\sigma_b - \sigma_c}{1.5f_t} \leq 1$
ベースプレート	SN490C	引張	490
連結ボルト	SCM435	引張	918
		せん断	530
基礎ボルト	SD345	引張	490
		せん断	282

※解析結果にて最大応力発生部位となった箇所の許容応力のみ記載

f_c : 許容圧縮応力, f_b : 許容曲げ応力, f_t : 許容引張応力
 σ_c : 圧縮応力, σ_t : 引張応力, ${}_c\sigma_b$: 圧縮曲げ応力, ${}_t\sigma_b$: 引張曲げ応力

保管架台の耐力評価（解析結果）

➤ 部材応力最大位置

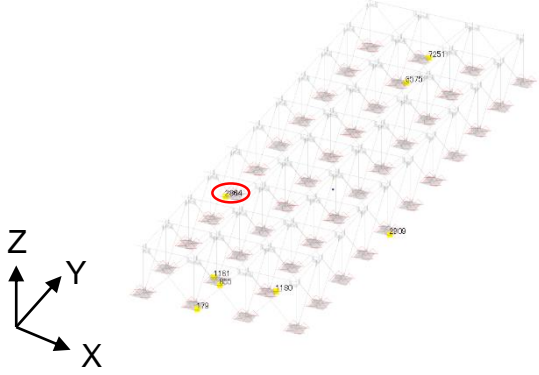
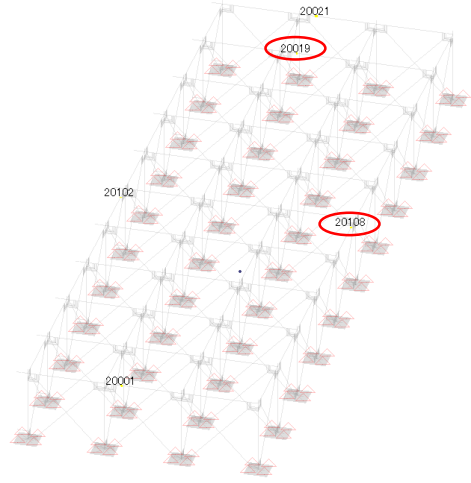
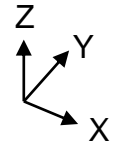
保管架台本体 自重+吸着塔衝突荷重 S (+Y)	ベースプレート 自重+吸着塔衝突荷重 S (+Y)
 <p>9274 7829 10274 7564 11608 10040</p>	 <p>2867 553 1541 5054</p>

※方位として, (+X)は西(W), (+Y)は南(S)を示す。

※図に記載の数字は接点番号を示す。

保管架台の耐力評価 (解析結果)

➤ 部材応力最大位置

基礎ボルト	連結ボルト
吸着塔衝突荷重W(+X)	自重+吸着塔衝突荷重W(+X)
	
吸着塔衝突荷重S(+Y)	

※方位として, (+X)は西(W), (+Y)は南(S)を示す。

※図に記載の数字は接点番号を示す。

保管架台の耐力評価（評価結果）

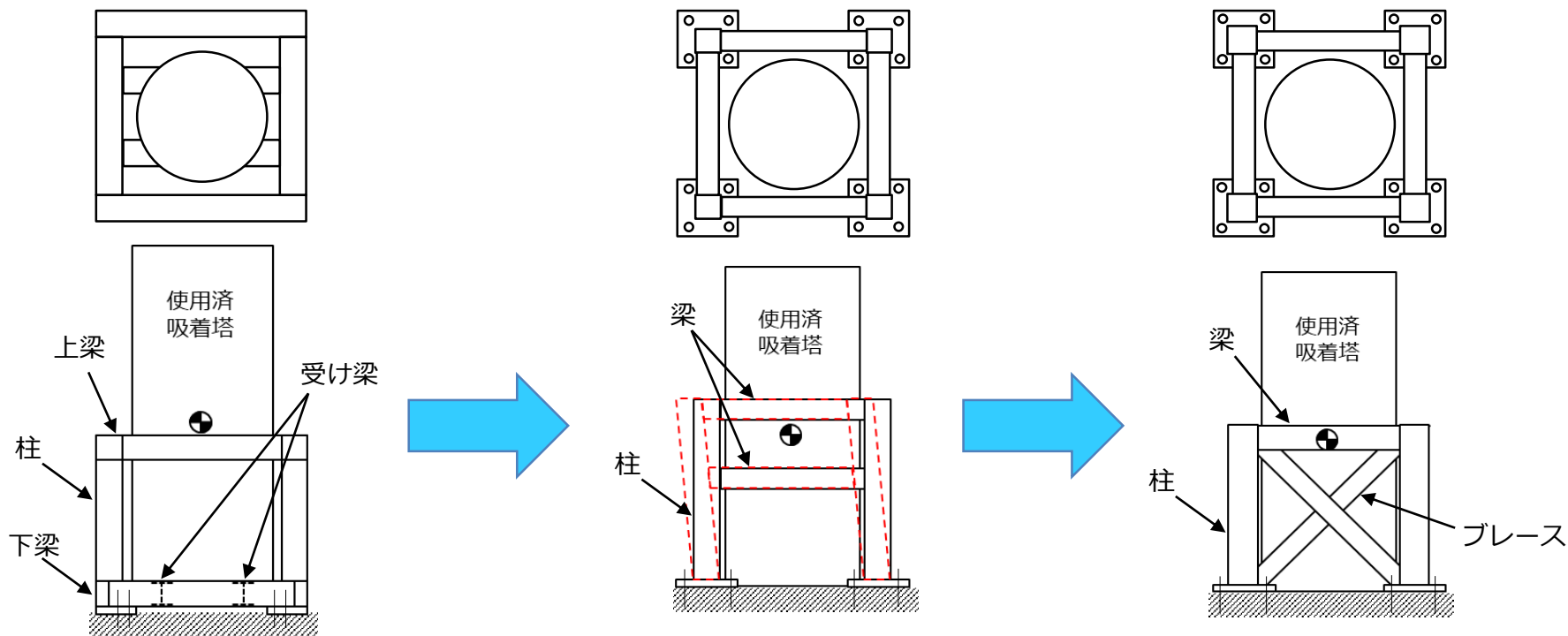
保管架台本体・ベースプレートの評価結果

対象	評価項目	評価部位	算出値（最大値）	許容応力	単位
保管架台本体	引張	ブレース	79.09	400	MPa
	せん断	ブレース	71.60	230	MPa
	圧縮	ブレース	73.84	369	MPa
	曲げ	梁	206.11	400	MPa
	評価項目	評価部位	算出値	許容値	単位
	組合せ (引張+曲げ)	梁	0.53	1.0	-
		梁	0.50	1.0	-
	組合せ (圧縮+曲げ)	梁	0.52	1.0	-
梁		0.52	1.0	-	
対象	評価項目	評価部位	算出値（最大値）	許容応力	単位
ベースプレート	組合せ	-	210.91	490	MPa

基礎ボルト・連結ボルトの評価結果

対象	評価項目	算出値（最大値）	許容応力	単位
基礎ボルト	引張	179.21	490	MPa
	せん断	213.58	282	MPa
連結ボルト	引張	34.83	918	MPa
	せん断	47.96	530	MPa

(参考) 保管架台の変遷



従来型は、吸着塔の屋外保管時に、雨水による吸着塔底部の腐食を防止する観点から、保管架台の受け梁に積載する構造としていた。

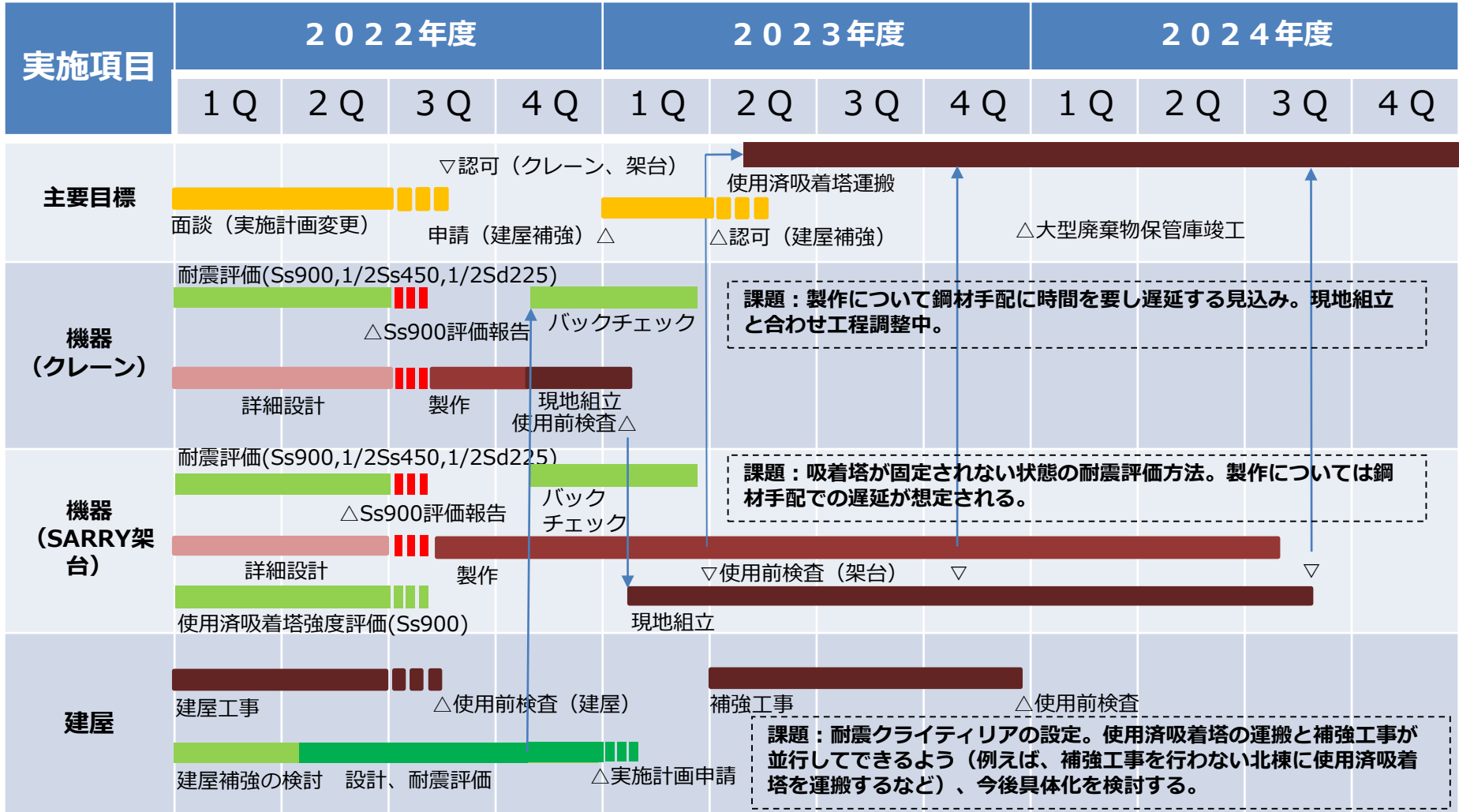
大型廃棄物保管庫の設置により吸着塔が屋内保管となることで、雨水による影響を受けないことから、床版に直置きする構造へ変更。また、吸着塔の接触時に吸着塔が大きく傾くことがないように、格納が想定される吸着塔の重心高さを包絡する位置に梁高さを見直し梁を追加。

しかし、梁に吸着塔が接触することで柱にモーメントが作用し、このモーメントにより基礎ボルトに作用する引張荷重が大きく、多数の基礎ボルトが許容限界を超えてしまった。

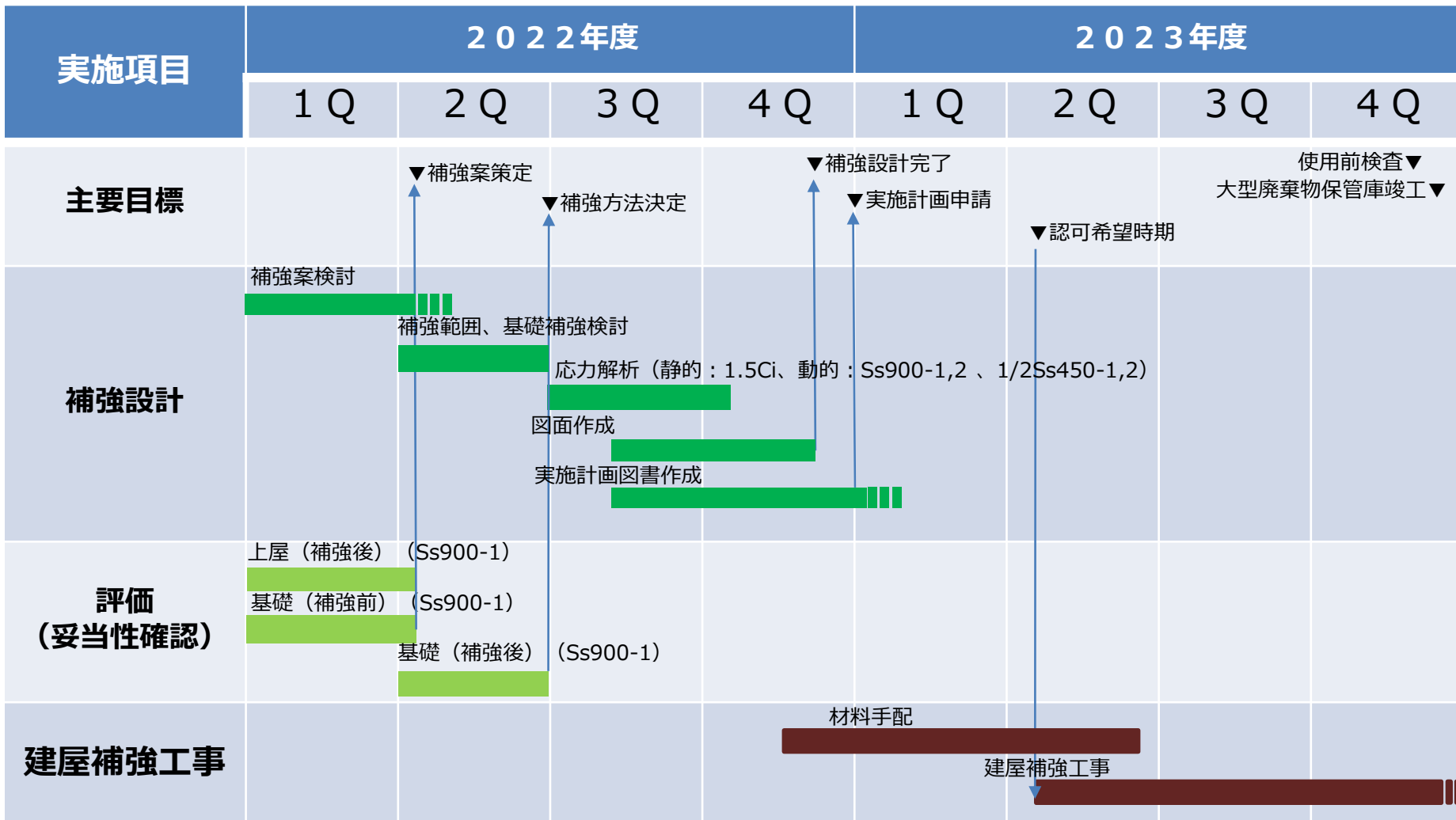
吸着塔の接触により柱に発生する変位角及びモーメントを低減させることを目的としてブレースを追加することにより、基礎ボルトに作用する引張荷重を低減。

※重心位置が最も高い高性能多核種除去設備吸着塔（ステンレス製）

- 大型廃棄物保管庫の設置に係る概略スケジュールは、3月14日の特定原子力施設監視・評価検討会を踏まえ、以下のとおり。各評価結果がまとめ次第、随時ご提示する。
- 使用済吸着塔の保管を早期に実現するため、建屋補強工事や運用の具体的検討を行っていく予定。



■ 大型廃棄物保管庫の建屋補強に係る概略スケジュール案は、以下のとおり。各評価結果がまとめ次第、随時ご提示する。



※設計の進捗及び評価結果によって、スケジュール案は変更になる場合がある。