



リサイクル燃料備蓄センターにおける津波防護方針について (貯蔵建屋損傷時の金属キャスクの基本的安全機能維持の確認)

令和元年12月9日

 **リサイクル燃料貯蔵株式会社**

目次

1. はじめに

- 1.1 基本的安全機能維持の確認の位置づけ
- 1.2 基本的安全機能維持の確認に係る評価の流れ

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

- 2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し
- 2.2 金属キャスクの閉じ込め評価の考え方
- 2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下
- 2.4 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下
- 2.5 閉じ込め機能の低下による影響

3. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

4. まとめ

1. はじめに

1.1 基本的な安全機能維持の確認の位置づけ

十分な保守性を有するよう設定した極めて確率の低い仮想的な大規模津波に対し、可能性の低い状況を含めて各段階で数々の保守的な仮定をおいても、金属キャスクの基本的な安全機能が維持されることを確認

【基本的な安全機能維持の確認のプロセス】

【保守的においた仮定】

十分な保守性を有する高さ23mの津波
(仮想的な大規模津波)を仮定

- 既往知見を十分に上回るよう設定した青森県津波をベース
- 敷地前面に加え周辺地域を考慮した最大の津波高さを選定
- さらに津波高さを2倍として設定

津波波圧による影響を保守的に考慮し、
貯蔵建屋受入れ区域の損傷を仮定

- 津波波圧として水深係数3を用い、貯蔵建屋の損傷の有無を判定

一時的な状態(受入れ区域にキャスクを
仮置中)での落下物の衝突を仮定しても
キャスクの密封境界部は健全性を維持

- 受入れ区域へのキャスク仮置中の一時的な状態での評価
- 最大の運動エネルギーを持つ落下物(天井クレーン)が衝突
- キャスクの閉じ込め上重要な蓋部に最大の衝突荷重を与える姿勢
- 衝突後に落下物が持つエネルギーもキャスクへの衝突荷重評価で考慮

閉じ込め機能の低下に燃料棒全数の
破損を重畳させてキャスクからの漏洩を
仮定しても、事業所周辺の実効線量は
年間1mSvに比べ極めて低い

- キャスク内の燃料棒全数が破損
- キャスク構造上最大の一次蓋の変位(横ずれ)
- 一次蓋の変位後のガスケットの漏洩率回復を無視
- 二次蓋、三次蓋によるFP放出の抑制を無視
- 保守側の評価となる気象条件

一時的な状態(受入れ区域にキャスクを仮置中)
で巨大な津波を受ける稀有な事象を仮定しても、
事業所周辺の実効線量は年間1mSvを下回る

- 受入れ区域へのキャスク仮置中(最大8基)の一時的な状態での評価
- 受入れ区域の外壁・天井は全て遮蔽に寄与しない
- 線源として最も厳しくなるキャスクの収納燃料条件
- 落下物の角部がキャスク側面に衝突し、中性子遮蔽材(固体)が喪失
- 受入れ区域に最も近い敷地境界に公衆が常時滞在
- 保守側の評価となる実効線量換算係数

1. はじめに

1.2 基本的安全機能維持の確認に係る評価の流れ(1/2)

- 津波防護方針の検討として、貯蔵建屋が損傷した場合でも金属キャスクの基本的安全機能が損なわれないことを確認するため、審査会合にて示された方針に基づき閉じ込め機能の確認及び遮蔽機能の確認を実施することとしている
- 当初の説明で示した考え方及び評価結果に対し、審査会合における議論を踏まえて評価方針の見直しを行った上で評価を実施

〔基本的安全機能維持の確認に係る評価の流れ〕

基本的安全機能維持の確認の前提

- 十分な保守性を有する仮想的な大規模津波を設定(津波高さ23m, 水深7m)
- 水深係数3を用いた波圧に基づき貯蔵建屋の損傷の有無を判定
- 受入れ区域の損傷を想定して基本的安全機能の確認を実施

評価事象の選定(2.1参照)

- 受入れ区域(損傷を想定)には金属キャスクを貯蔵しないが、金属キャスクの搬入・搬出時に津波の襲来を受けた場合を仮定して評価
- 金属キャスクの運用状態と受入れ区域損傷に伴い考えられる落下物の組み合わせから、金属キャスクの密封境界部への衝突荷重が大きい事象を選定
 - 水平姿勢の金属キャスクへの落下として、天井クレーンがたて起こし架台上の金属キャスクの蓋部付近に落下
 - 縦姿勢の金属キャスクへの落下として、天井スラブが搬送中の金属キャスクの頂部に落下

衝突荷重の設定

- 衝突時の挙動(落下物の質量、速度、形状、材質)に基づき、工学式により金属キャスクに与える衝突荷重を設定
- 衝突時に金属キャスクに与える荷重として、衝突後に落下物が持つエネルギーもキャスクへの衝突荷重評価で考慮
- 衝突荷重を大きく見積もるよう考慮(衝突時の作用時間を短めに設定する等)

構造強度評価

- 密封境界部の健全性を、衝突荷重を入力とした静的解析により確認
 - 一次蓋締付けボルトの応力<設計降伏応力 S_y
 - 一次蓋密封シール部が概ね弾性範囲
 - 衝突時の挙動、衝突荷重の妥当性等を確認するため、動的解析結果を参照

天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下:2.3参照

天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下:2.4参照

閉じ込め機能の維持の確認

- 建屋損傷に伴う落下物等に対して密封性能が維持
- 具体的には、衝突荷重に対し密封境界部が概ね弾性範囲

(次頁に続く)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し(1/6)

想定落下条件の見直しの概要

〔当初の評価方針〕

- 受入れ区域の損傷に伴い生じる落下物に対し、当初は動的解析により金属キャスクの頑健性を示す前提で検討
- 受入れ区域の損傷に伴う落下物を以下の考え方にに基づき設定
 - 落下物を抽出するとともに、落下物の金属キャスクへの衝突状態を設定
 - 落下物の抽出結果及び衝突状態の設定に基づき、代表性の観点から衝突想定条件を検討
 - 動的解析では衝突挙動を評価できるものの不確かさが大きいと考えられることから、現実的には考え難い極めて保守的な落下物として「架構鉄骨と天井スラブの組合せ」を想定

〔審査会合における議論を踏まえた評価方針〕

- 金属キャスクの閉じ込め機能の健全性を評価する上で、過度な保守性を排除した現実に即した想定とし、受入れ区域の上部構造を踏まえて落下物を見直し
 - 水平姿勢の金属キャスクに対する想定落下条件として、天井クレーンの落下を設定
 - 架構鉄骨と天井スラブの組合せのような場合を、想定落下条件から除外
- 併せて、縦姿勢の金属キャスクに対しても想定落下条件を設定
 - 縦姿勢の金属キャスクへの落下の可能性を考慮し、天井スラブの落下を設定
- 設定した想定落下条件に基づいて荷重を設定し、静的解析により閉じ込め機能の健全性を評価（水平姿勢キャスク＋天井クレーン落下の評価：2.3, 縦姿勢キャスク＋天井スラブ落下の評価：2.4）

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し(2/6)

落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定(建屋構造材)

落下物	質量 (t)	落下高さ(m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー(N・m)	衝突想定条件(代表事象)として選定	
架構鉄骨	約183 (約28(鉄骨) + 約155(スラブ))	約14	水平	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある架構鉄骨が天井スラブを伴い自由落下(模式図を次々頁③に示す)	貯蔵建屋受入れ区域の損傷が大きい場合、架構鉄骨の落下は否定できないが、金属キャスクに衝突するには延性のある鋼材である架構鉄骨の両端が破断して落下する必要があり、天井スラブのみの落下に比べれば可能性は小さい	約 2.5×10^7	—	
	同上	約7.7	縦	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、搬送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある架構鉄骨が天井スラブを伴い自由落下	同上	約 1.4×10^7	—	

架構鉄骨と天井スラブの同時落下は仮定しない(「鉄骨+スラブ」は落下物から除外)

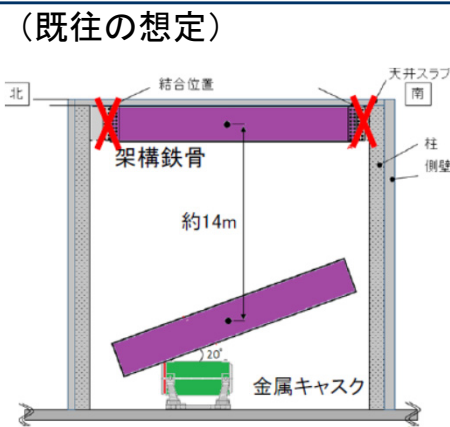
- 天井スラブは架構鉄骨に載った状態で支持される構造(架構鉄骨に直接固定されていない)
- 架構鉄骨と天井スラブと一緒に落ちて同時に金属キャスクに衝撃を与える可能性は考え難い

架構鉄骨(大梁:20t程度)を落下物から除外

- 架構鉄骨の大梁は受入れ区域北側及び南側の柱にボルトで接合されており、また保有耐力接合(母材強度よりも高い荷重でも接合部が保持)
- 両方の結合部が同時に破損する可能性は考え難い
- 仮に片方(北側)の結合部が破損しても、架構鉄骨が自由落下して金属キャスクに衝突する可能性は考え難い(落下エネルギーが部材の変形に使われる形での落下が考えられる)

架構鉄骨(小梁:~1.1t/本程度)を落下物から除外

- 大梁と小梁は格子状に連結されており、小梁の両端が同時に破損して自由落下する可能性は考え難い



2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し(3/6)

落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定(建屋構造材: 続き)

落下物	質量(t)	落下高さ(m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー(N・m)	衝突想定条件(代表事象)として選定	
コンクリート側壁	約73	約7.2	水平	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、たて起し架台上の金属キャスクの上部まで伸びた柱間の北側側壁が転倒し自由落下(金属キャスクが水平姿勢の場合の模式図を次頁①に示す)	北側側壁が損傷した場合、コンクリートが破損、変形して倒れ、金属キャスクへの衝突が想定される	約 5.2×10^6	—	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さいことから、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
		—	縦		搬送中の金属キャスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	—	金属キャスクへの衝突は考え難いため除外
クレーンガーダ	約11	約7.1	水平	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、たて起し架台上の金属キャスクの上部にある北壁側のクレーンガーダが自由落下(金属キャスクが水平姿勢の場合の模式図を次頁④に示す)	北側側壁が損傷した場合、側壁の柱が損傷するのに伴い柱で支えられたクレーンガーダが落下し、金属キャスクへの衝突が想定されるが、クレーンガーダと北壁の柱を結合する金具が破断して落下する必要がある、天井スラブのみの落下に比べれば可能性は小さい	約 7.7×10^5	—	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さいことから、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
		—	縦		搬送中の金属キャスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	—	金属キャスクへの衝突は考え難いため除外
天井スラブ(単独)	約23	約19	水平	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、たて起し架台上の金属キャスクの上部にある天井スラブが自由落下(模式図を次頁②に示す)	貯蔵建屋受入れ区域の損傷が大きい場合、天井のコンクリートスラブが破損、変形して落下し、金属キャスクへの衝突が想定される	約 4.3×10^6	—	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さいことから、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
	約30	約16.6	縦	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、搬送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある天井スラブが自由落下	同上	約 4.9×10^6	○	衝突想定条件(代表事象)として選定

○：衝突想定条件(代表事象)として選定

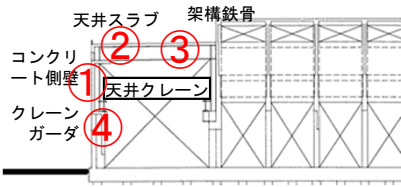
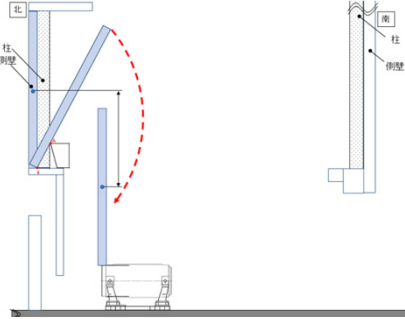
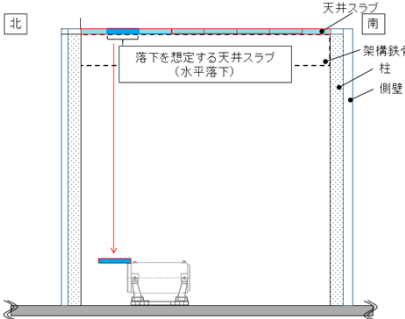
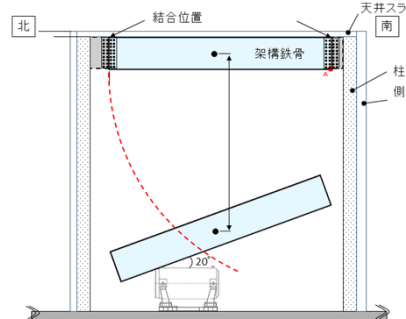
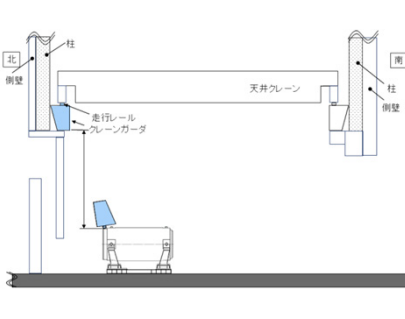
金属キャスクが縦姿勢の場合の想定落下条件として、天井スラブ(単独)を仮定

- 天井クレーンが縦姿勢の金属キャスクの上に落下する可能性は小さい
 - ・ 金属キャスクが縦状態となるのは受入れ区域の南側
 - ・ 受入れ区域北側外壁の破損により、天井クレーンは北側から落下すると考えられる
- 建屋構造材のうち落下エネルギーが最も大きくなるのは天井スラブ

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し(4/6)

落下物及び落下形態の想定(建屋構造材)

貯蔵建屋受入れ区域概略図	①コンクリート側壁	②天井スラブ(単独)	③架構鉄骨	④クレーンガーダ
				
<p>貯蔵建屋受入れ区域の構造を踏まえ、北側側壁の破損に伴う建屋構造材の落下物として以下を考慮する。</p> <p>①コンクリート側壁</p> <p>②天井スラブ(単独)</p> <p>③架構鉄骨(受入れ区域の天井スラブを支持する梁であり、南北方向の大梁と、大梁の間に東西方向に掛けられた小梁で構成される)</p> <p>④クレーンガーダ(貯蔵建屋受入れ区域の北側及び南側に、受入れ区域天井クレーンの走行レールを支持するためのクレーンガーダが設置されている。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 北側側壁の衝突として、落下高さが大きく衝突エネルギーが大きい上部の側壁の落下(転倒)による衝突を仮定する。 側壁は柱で仕切られており側壁全体が一体となって転倒する可能性は小さいと考えられることから、破損に伴う落下物のサイズとして、たて起こし架台付近の1区画(幅6.75m×高さ8.8m×厚さ0.5m)を考慮する。 水平姿勢の金属キャスク蓋部への衝突荷重が大きくなるよう、側壁の転倒状況を保守的に見込み、側壁が鉛直な状態で金属キャスク蓋部に衝突する状態を仮定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 天井スラブは、架構鉄骨(南北方向の大梁及び東西方向の小梁)で支持されている。 延性のある鋼材である架構鉄骨が破断しない場合、落下する天井スラブの断片の大きさは架構鉄骨の区画内に制限されることから、破損に伴う落下物のサイズとして、架構鉄骨の大梁と小梁で仕切られた1区画を考慮する。 <p>[金属キャスクが水平姿勢の場合]</p> <ul style="list-style-type: none"> 東西6.75m×南北約2.7m×厚さ0.5m(たて起こし架台付近で最大の1区画) <p>[金属キャスクが縦姿勢の場合]</p> <ul style="list-style-type: none"> 東西9m×南北約2.7m×厚さ0.5m(受入れ区域全体で最大の1区画) 	<p>(架構鉄骨と天井スラブの同時落下は仮定せず、また架構鉄骨を落下物から除外(2.1(2/6)参照))</p>	<ul style="list-style-type: none"> 北側側壁の破損に伴い、柱で支持されている北側のクレーンガーダが落下し金属キャスク蓋部に衝突する状態を仮定する。 金属キャスク蓋部への衝撃の観点から、取付位置はクレーンガーダの上部であるが、剛性の高い走行レールが金属キャスク蓋部に衝突する状態を仮定する。

縦姿勢の金属キャスクの衝突
想定条件(代表事象)として選定

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し(5/6)

落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定(受入れ区域天井クレーン)

落下物	質量(t)	落下高さ(m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー(N・m)	衝突想定条件(代表事象)として選定	
主巻フック	約3.45	約7.8	水平	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある受入れ区域天井クレーンが北側クレーンガーダから外れて自由落下	貯蔵建屋受入れ区域の損傷により、クレーンが走行レールから脱輪し金属キャスクへの衝突が想定される	約 2.6×10^5	—	落下エネルギーがクレーン本体(けた+サドル+走行車輪)の落下に比べ小さいことから、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
けた	約128	約5.3	水平			約 6.7×10^6	○	落下エネルギーが建屋構造材、受入れ区域天井クレーンを通じて最大であることから、衝突想定条件(代表事象)として選定
サドル								
走行車輪								
トリフレーム	約43	約10	水平	模式図を次頁①～④に示す ①:主巻フック ②:けた、サドル、走行車輪 ③:トリフレーム ④:運転室	約 4.2×10^6	—	落下エネルギーがクレーン本体(けた+サドル+走行車輪)の落下に比べ小さいことから、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外	
運転室	約128	—	水平		運転室は受入れ区域天井クレーンの南側にあり、受入れ区域の北側に仮置きされている金属キャスクの上部にある可能性は小さく、衝突は考え難い	—	—	金属キャスクへの衝突は考え難いため除外
主巻フック	約3.45	約5.5	縦	津波波力により貯蔵建屋受入れ区域が損傷し、搬送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある受入れ区域天井クレーンが北側クレーンガーダから外れて自由落下	金属キャスクが縦姿勢での搬送は搬送台車で行うことから、受入れ区域天井クレーンが縦姿勢の金属キャスクの上部にある可能性は小さく、衝突は考え難い	約 1.9×10^5	—	受入れ区域天井クレーンが縦姿勢の金属キャスクの上部にある可能性は小さく、金属キャスクへの衝突は考え難いため除外
けた	約128	約5.9	縦			約 7.4×10^6	—	
サドル								
走行車輪								
トリフレーム	約43	—	縦			—	—	
運転室	約128	—	縦	—	—			

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.1 受入れ区域の損傷に伴う想定落下条件の見直し(6/6)

落下物及び落下形態の想定(受入れ区域天井クレーン)

受入れ区域天井クレーン概略図	①主巻フック	②けた、サドル、走行車輪	③トロリフレーム	④運転室
<p>受入れ区域天井クレーン構造及び落下に伴う衝突荷重の掛かり方を踏まえ、北側側壁の破損に伴う落下による衝突箇所として以下を考慮する。</p> <p>①主巻フック ②けた、サドル、走行車輪 ③トロリフレーム ④運転室</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時の緩衝材取り外し等の作業を行う際に、主巻フックが金属キャスク蓋部の上部に接近することから、主巻フックの落下を仮定する。 主巻フックはワイヤで受入れ区域天井クレーン本体に接続されており、クレーン本体とは固定されていないことから、金属キャスクへの衝突時には単独の衝突を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時に受入れ区域天井クレーンが仮置中の金属キャスクの上部を横断することから、受入れ区域天井クレーンの落下を仮定する。 受入れ区域天井クレーンの部品のうちけた、サドル、走行車輪は互いに固定されており、金属キャスクへの衝突時にはこれらの荷重が同時に加わると考えられることから、けた、サドル、走行車輪を一体として考慮する。 <p style="border: 1px solid red; padding: 5px; color: red;">水平姿勢の金属キャスクの衝突想定条件(代表事象)として選定</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時の緩衝材取り外し等の作業を行う際に、トロリフレームが金属キャスク蓋部の上部に接近することから、トロリフレームの落下を仮定する。 トロリフレームは、けた上の横行レール上に載っており、クレーン本体とは固定されていないことから、金属キャスクへの衝突時には単独の衝突を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> けた(西側)の南側下部に運転室が付いており、受入れ区域天井クレーン落下時には突起部として先に衝突する可能性が考えられることから、運転室が受入れ区域天井クレーン本体(けた、サドル、走行車輪)の荷重を受けて金属キャスク蓋部に衝突する可能性を考慮する。

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.2 金属キャスクの閉じ込め評価の考え方

〔当初の評価方針〕

- 受入れ区域の損傷に伴い生じる落下物に対し、動的解析により金属キャスクの頑健性を示す前提
- 落下物の衝突事象を扱うことから、直接的な評価が可能な動的解析により金属キャスクの密封境界部の評価を実施（一次蓋締付ボルトの応力、密封シール部の塑性ひずみ、一次蓋の横ずれ量）
- 動的解析では衝突挙動を評価できるものの不確かさが大きいと考えられることから、極めて保守的な落下物を設定

〔審査会合における議論を踏まえた評価方針〕

- 静的な工学式や許認可実績のある解析コードを主とした評価
 - ・ 動的解析に依存した評価とする場合、許認可解析における使用実績や妥当性を確保するための前提条件等の観点から課題が多いことを考慮
- 工学式に基づき、静的解析の入力条件となる荷重条件を設定
 - ・ 荷重の大きさは、衝突現象の許認可解析で実績のある手法を用いて設定（衝突評価で用いられているRieraの考え方を取り入れた竜巻飛来物の衝突評価で実績）
 - ・ 荷重は保守的に設定（衝突後に落下物が持つエネルギーもキャスクへの衝突荷重評価で考慮、荷重作用時間等）
→天井クレーン落下＋水平キャスク:2.3(1), 天井スラブ落下＋縦キャスク:2.4(1)
- 静的解析を用いて、落下物の衝突荷重に伴う応力評価に使用
 - ・ 密封境界部がおおむね弾性領域であることを確認
 - ・ 保守的に設定した荷重条件や金属キャスクの拘束条件（水平状態でトラニオンは固定等）を使用
→天井クレーン落下＋水平キャスク: 2.3(2)(3), 天井スラブ落下＋縦キャスク: 2.4(2)(3)
- 動的解析は、静的解析の補足的な役割で使用
 - ・ 天井クレーンの衝突に伴う全体的な挙動の確認、工学式に基づき設定した荷重条件（最大荷重、算出条件）の妥当性を確認
 - ・ 静的解析による評価が困難な項目に関する確認（金属キャスク内に収納された燃料の健全性、天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性）
→天井クレーン落下＋水平キャスク: 2.3(4)～(6)
- 一次蓋の横ずれ量は、解析に依存しない方法により設定(2.5(2)参照)
 - ・ 一次蓋の横ずれ量は金属キャスクの構造上制約されており、実験的知見に基づき漏洩率を設定してFP放出量評価に反映

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (1)衝突荷重の設定(1/2)

天井クレーン落下時の衝突荷重の設定の考え方

- 工学式に基づき、静的解析の入力条件となる落下物の衝突時の荷重を設定
- 衝突現象の許認可解析で実績のある手法(衝突評価で用いられているRieraの考え方を取り入れた竜巻飛来物の衝突評価で実績)により荷重を設定(図1参照)
- 落下エネルギーはすべて天井クレーンの塑性変形で吸収されると仮定(実際にはキャスクの塑性変形や落下物の衝突後の運動エネルギーにも変換)
- 落下物の落下エネルギーと塑性変形によるエネルギーが等しくなるよう、変形量(L)を算出

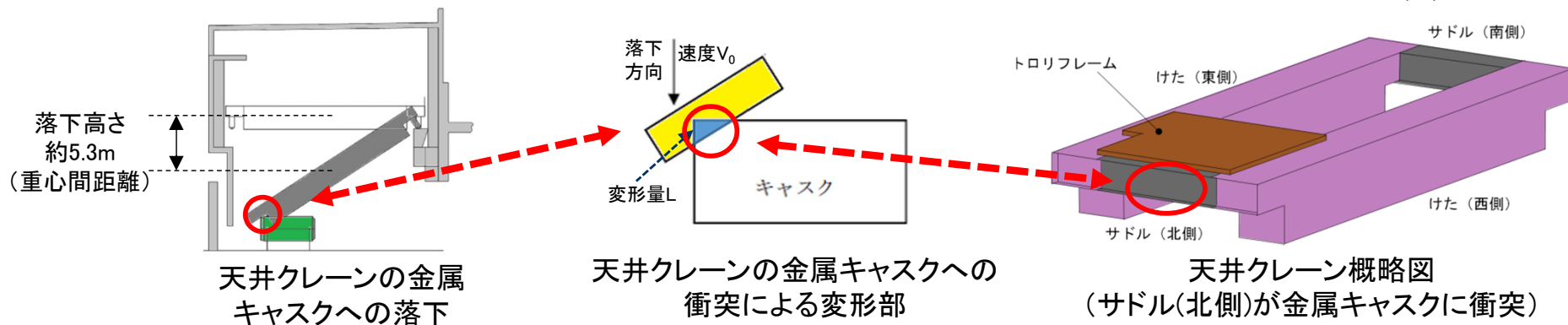


図1 衝突時の荷重設定の概念図

- 荷重作用時間(t_e)を変形量/初期速度(L/V_0)で算出(衝突時の減速を考慮せず、荷重作用時間を短めに評価)
- 落下物の荷重時刻歴を三角形状とし、時刻 t_e (荷重作用時間)で0になると仮定すると下式が成り立つため、最大荷重(F_0)を m, V_0, t_e から算出(図2参照)

$$m \cdot V_0 = \int_0^{t_e} F(t) dt = \int_0^{t_e} F_0 \{1 - (t/t_e)\} dt = F_0 \cdot t_e / 2$$

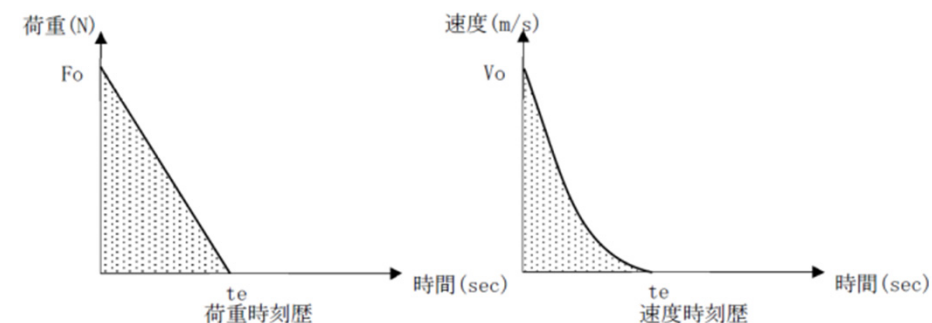


図2 衝突時の荷重及び速度変化(模式図)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (1)衝突荷重の設定(2/2)

天井クレーン落下時の荷重設定の前提条件

項目	数値	備考
落下高さ	5.3m	・ 天井クレーンの通常時及び金属キャスクへの衝突時の重心高さの差
落下物の衝突速度(V_0)	10.2m/s	・ 天井クレーンの落下高さ(上記)に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
落下物の質量(m)	128t	・ 天井クレーンの質量
衝突部の形状	サドル部の形状を考慮	・ 鋼板を組合わせ(断面幅約1.2m×高さ約1.0m)補強用のリブを入れた構造
単位体積あたりの塑性エネルギー	$5.03 \times 10^8 \text{J/m}^3$	・ サドル部材の流動応力(503MPa:降伏応力と引張強さの平均)に基づく ・ サドル部材の降伏応力(450MPa)と引張強さ(555MPa)は実測値を使用(材料強度が高い方が衝突荷重が大きくなるため、規格値ではなくミルシートの値を使用)

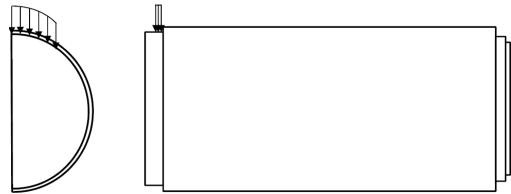
荷重設定の結果

項目	数値	備考
落下エネルギー	約 $7.3 \times 10^6 \text{J}$	・ 天井クレーンの落下高さ(5.3m)+変形量(下記)に相当
変形量(L)	約0.55m	・ 単位体積あたりの塑性エネルギー×変形部の体積(変形量に基づく)が落下エネルギー(上記)と等しくなるような変形量(高さ)
荷重作用時間(t_e)	約0.054s	・ 変形量(L)／衝突速度(V_0)
落下時の運動量	約 $1.3 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{s}$	・ 落下物の質量(m)×衝突速度(V_0)
最大荷重(F_0)	約48MN	・ 前頁末の算出式に基づき、落下物の質量(m)、衝突速度(V_0)、荷重作用時間(t_e)を用いて $F_0=2mV_0/t_e$ として算出

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (2)静的解析の評価条件

主な評価条件

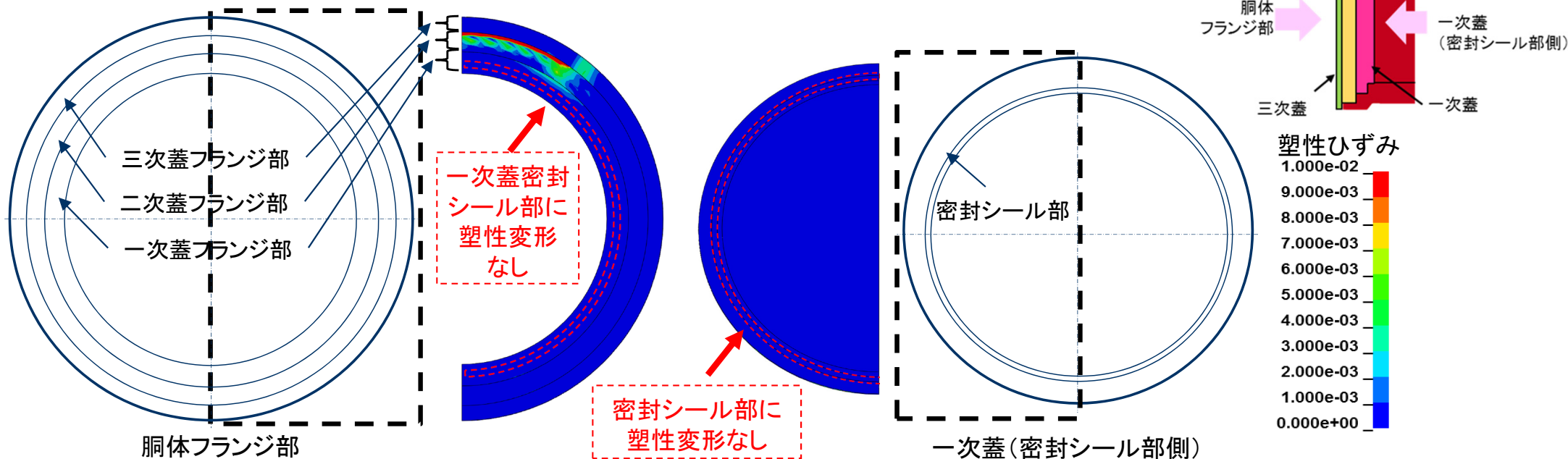
項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS(衝撃・構造解析ソフトウェア)	<ul style="list-style-type: none"> 米国HKS社(現ダッソーシステムズ社)で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード 応力解析、熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ、特に非線形解析が容易に行えることが特徴 金属キャスクの応力解析、発電用原子炉の応力解析(原子炉容器、炉心支持構造物、蒸気発生器等)で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> 荷重48MN 荷重範囲は、軸方向は一次蓋側面に相当する範囲、周方向は金属キャスク直径の約1/2の範囲として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重の値(48MN)は衝突荷重の設定結果(2.3(1)参照)に基づく 密封境界部(一次蓋、一次蓋フランジ及び一次蓋締付ボルト)に作用する荷重が大きくなるよう、荷重範囲及び荷重分布を設定(右図参照)  <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方(模式図)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクは全体形状を模擬 金属キャスクはたて起こし架台上を想定した水平姿勢 金属キャスクの支持部(たて起こし架台)はモデル化せず、トラニオンを固定 三次蓋がない状態を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクに緩衝体を取り付けられていない、たて起こし架台上を想定(仮置架台上の金属キャスクには緩衝体を取り付けられており、落下物の衝突に対しても蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる) 天井クレーンの衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から、支持部(たて起こし架台)の変形は考慮しない たて起こし架台上では三次蓋が取り付けられているが、三次蓋及び三次蓋締付ボルトにより密封境界部(一次蓋)に作用する荷重が抑制されるため、保守的に抑制効果を見做す

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (3) 静的解析の評価結果

衝突部の塑性ひずみ

- 胴体の二次蓋フランジ部、一次蓋フランジ部の外縁等の一部塑性変形が見られるが、一次蓋密封シール部に塑性変形は見られない
- また、一次蓋の密封シール部に塑性変形は見られない



一次蓋用締付ボルトの応力

- 一次蓋用締付ボルトのボルト応力は降伏応力を超えず弾性範囲

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○(約735MPa)	設計降伏点(Sy値) 一次蓋締付ボルト 831MPa

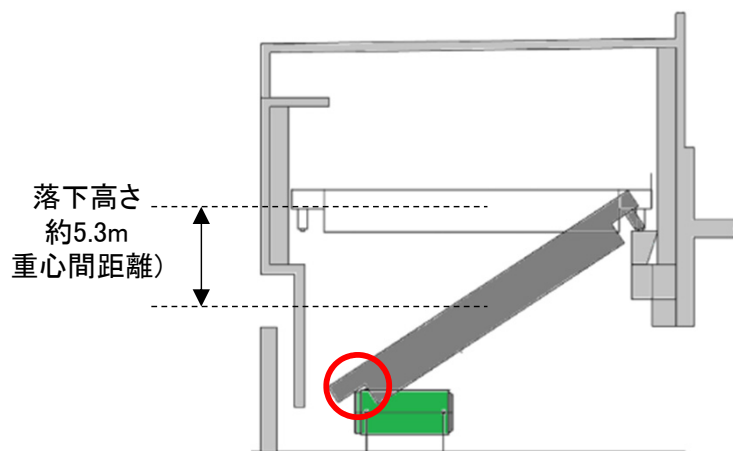
→ 一次蓋の閉じ込め機能が維持されることを確認

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

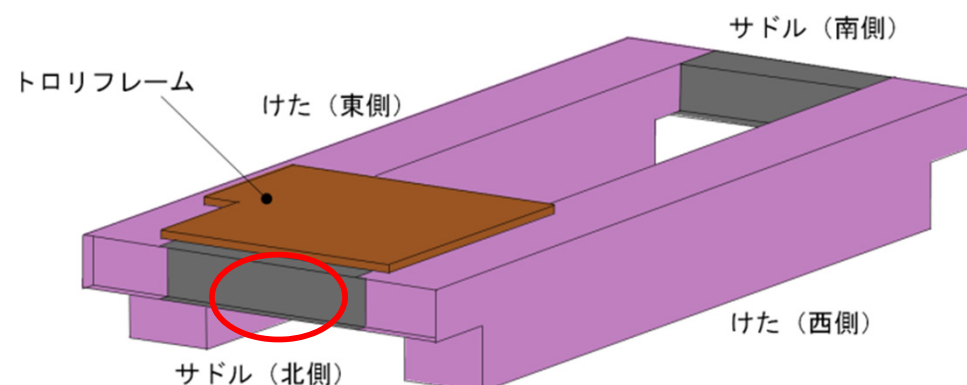
2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (4)動的解析の目的

動的解析の目的

- 動的解析を静的解析の補足的な役割で使用
- 全体的な挙動の確認
 - 落下物の金属キャスクへの衝突時の挙動が、工学式や静的解析の前提条件と整合しているか
- 工学式に基づき設定した荷重条件(荷重の大きさ、変形量)の妥当性の確認
 - 閉じ込め機能に対する影響の観点から、全体として保守的な扱いとなっているか
- 静的解析による評価が困難な項目に関する確認
 - 金属キャスク内に収納された燃料の健全性
 - 天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性



天井クレーンの金属
キャスクへの落下



天井クレーン概略図
(サドル(北側)が金属キャスクに衝突)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下(5)動的解析による確認(1/2)

動的解析による確認

➤ 全体的な挙動の確認

- 天井クレーンのサドル(北側)が金属キャスクへ衝突し、サドルの変形が進展(下図参照)
- サドルの変形挙動は、荷重の設定(2.3(1)参照)の前提条件とほぼ整合

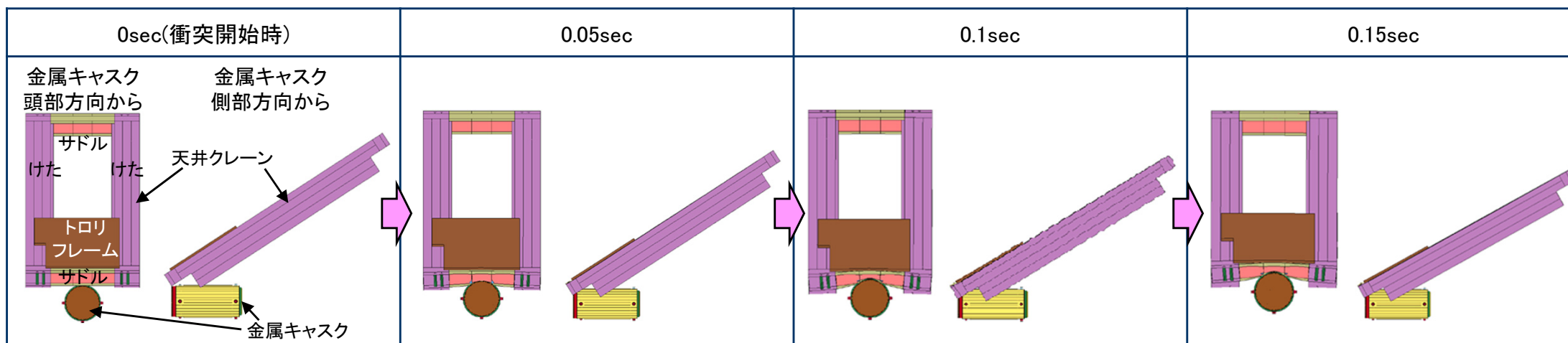
➤ 金属キャスクに与える荷重は最大で6MN

- 工学式に基づき静的解析の条件とした荷重(48MN) (2.3(1)参照)が大きな保守性を持っていることを確認

➤ サドル(北側)の変形量は最大で約0.42m

- 工学式に基づく荷重の設定(2.3(1)参照)では変形量を約0.55mとしており、荷重の設定の前提条件が保守的であることを確認

→ 静的解析の前提とした衝突時の挙動や荷重設定の妥当性を確認



天井クレーン衝突時の挙動推移(動的解析による結果)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下(5)動的解析による確認(2/2)

(参考) 主な評価条件

項目	解析条件	備考
解析コード	LS-DYNA (衝撃・構造解析ソフトウェア)	<ul style="list-style-type: none"> ローレンス・リバモア国立研究所により開発された有限要素法(DYNA3D)を基に開発された構造解析用の汎用コードであり、衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力、ひずみや加速度応答等を算出 輸送物の設計承認、発電用原子炉の設置許可*1関連の解析で実績があり、また金属キャスク落下試験に基づく検証解析例*2 <ul style="list-style-type: none"> *1) 重大事故等対策の有効性評価(水蒸気爆発時のペDESTAL構造評価) *2) 貯蔵建屋内金属キャスク落下衝撃解析手法の整備に関する報告書(H18.6.(独)原子力安全基盤機構)
天井クレーンの衝突姿勢	<ul style="list-style-type: none"> 天井クレーンは南北方向を向いたまま、サドル部が金属キャスクの蓋部側面に衝突 天井クレーンは金属キャスクの直上より、水平姿勢から約33°傾斜させて衝突 	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵建屋受入れ区域の北側側壁で津波波力による応力が許容応力を超えることから、天井クレーンが水平方向に回転することは考え難い 貯蔵建屋受入れ区域の北側側壁が破損し、南側の支持部を支点に回転して金属キャスクの蓋部に当たる状況を仮定(なお、密封境界部に作用する荷重が大きくなるよう、一次蓋側面にサドル立板を衝突させる)
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクは全体形状を模擬 金属キャスクはたて起こし架台上を想定し、水平姿勢で三次蓋を取り付けた状態 金属キャスクの支持部(たて起こし架台)はモデル化せず、トラニオンを固定 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクに緩衝体を取り付けられていない、たて起こし架台上を想定(仮置架台上の金属キャスクには緩衝体を取り付けられており、落下物の衝突に対しても蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる) 天井クレーンの衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から、支持部(たて起こし架台)の変形は考慮しない
落下物の衝突速度	約10.2m/s	<ul style="list-style-type: none"> 天井クレーンの落下高さ(約5.3m)に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
天井クレーンのモデル	<ul style="list-style-type: none"> けたとサドルをシェル要素でモデル化 トロリフレームはソリッド要素に一様密度を与えて重量模擬し、走行方向(南北方向)以外を拘束 	—
天井クレーンの質量	128t	—
天井クレーン部材の物性値	縦弾性係数: 203000MPa ポアソン比: 0.3 降伏応力: 450MPa(サドルの場合) 引張強さ: 555MPa(同上)、伸び: 0.23(同上)	<ul style="list-style-type: none"> 縦弾性係数は鉄骨材料に基づき炭素量0.3%以下の炭素鋼の値を使用 降伏応力、引張強さ及び伸びは材料の実測値を使用(材料強度が高い方が、衝突荷重が大きく評価上厳しくなるため、規格値ではなくミリシートの値を使用)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (6)参考評価(1/2)

金属キャスク内に収納された燃料の健全性

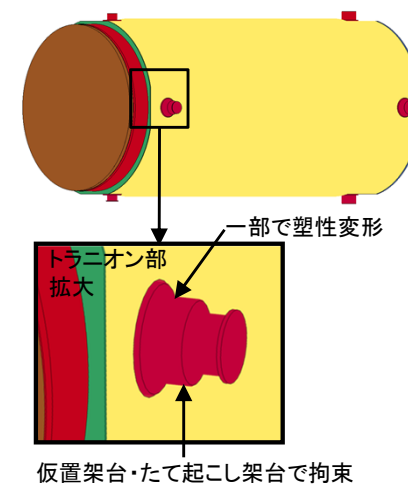
- 落下物の衝突時に燃料棒が破断に至る可能性は考え難いことを確認
 - 燃料は金属キャスクの内部にあるため落下物の荷重が直接作用せず、衝撃荷重がバスケット等を伝搬することによって影響を受けるため、動的解析の結果を参照
 - 動的解析(天井クレーン落下による衝突)の結果、金属キャスク(胴体中央)の加速度は最大でも5G程度
 - 照射済の燃料被覆管を用いた動的座屈試験(次頁参考参照)の結果に基づき、燃料棒の破断に至る加速度を推定した結果、約980G(燃料棒軸方向)、約5800G(燃料棒径方向)の加速度が必要(下表参照)
 - 動的解析の結果は燃料棒の破断に至る加速度に比べ非常に小さいことから、金属キャスクへの衝突時の衝撃で燃料棒が破断し、ペレットが燃料棒から逸脱する可能性は考え難い

動的座屈試験結果に基づく、燃料棒破断に至る加速度の推定

荷重作用方向	燃料棒の破断が確認されていない荷重	試験結果より算出した破断に至る加速度	備考
燃料棒軸方向	46kN	約980G	燃料棒1本当たりの質量: 約4.8 kg(高燃焼度8×8燃料)
燃料棒径方向	0.5kN/mm	約5800G	燃料棒の単位長さ当たりの質量:約 1.1×10^{-3} kg/mm タイロッド本数:8本/集合体

天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性

- 天井クレーンの衝突荷重が加わっても、金属キャスクのトラニオンが破断し、たて起こし架台及び仮置架台から落下する可能性は考え難い
 - 動的解析の結果、トラニオンのひずみは最大でも0.2%
- なお、仮にトラニオンが破断しても金属キャスクが受入れ区域の床面に直接衝突することはない
 - たて起こし架台の下には衝撃吸収材を設置
 - 仮置架上の金属キャスクには輸送用の緩衝体を取付け

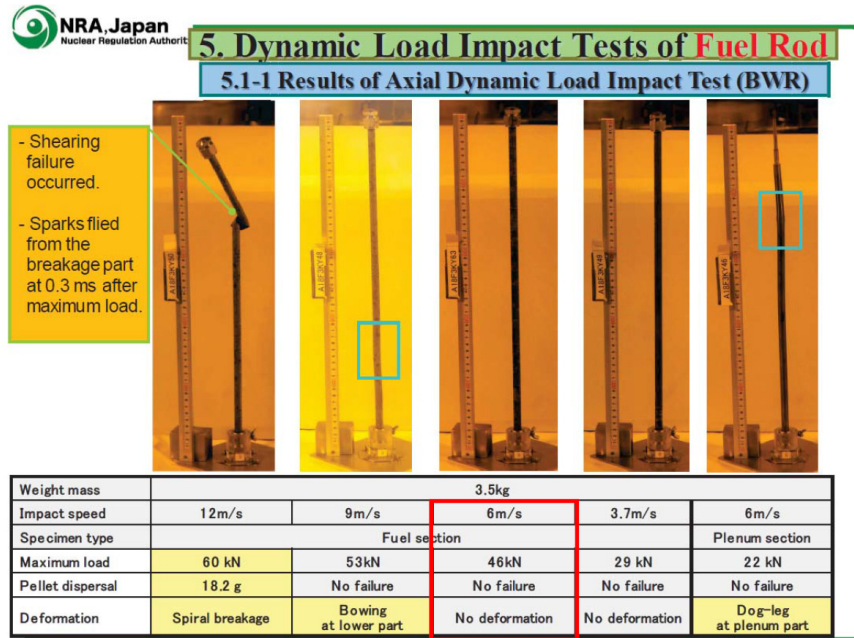


2. 金属キャスクの閉じ込め評価

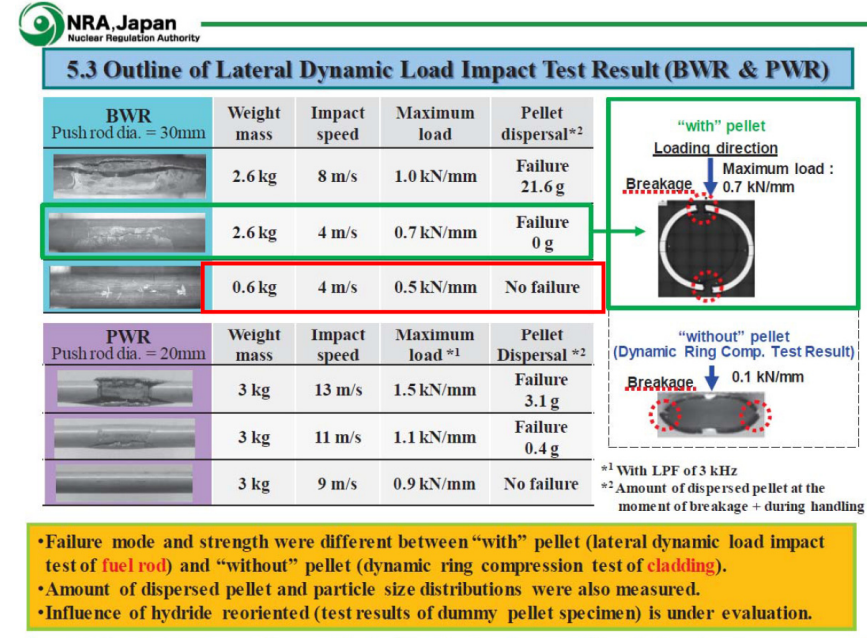
2.3 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下 (6)参考評価(2/2)

(参考)燃料棒動的座屈試験*の概要

- 照射済の燃料被覆管に荷重を与えて燃料棒の破断の有無を確認
 - 9×9(A型)燃料、平均燃焼度55.6GWd/t
 - 燃料棒平均高速中性子照射量(E>1MeV)10.3×10²⁵/m²)
- 2種類の試験を実施
 - 軸方向動的座屈試験: 燃料棒の1スパン分(約500mm)を模擬した試験片に、軸方向に動的荷重を与える
 - 径方向動的圧縮試験: 燃料棒の一部(約150mm)を模擬した試験片に、径方向に動的荷重を与える
- 軸方向荷重で~46kN、径方向荷重で~0.5kN/mmの範囲で、燃料被覆管の破断が生じない結果



燃料棒軸方向評価結果



燃料棒径方向評価結果

* T. Hirose, M. Ozawa, A. Yamauchi, “Fuel Rod Mechanical Behaviour Under Dynamic Load Condition on High Burnup Spent Fuel of BWR and PWR”, International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: An Integrated Approach to the Back-End of the Fuel Cycle, 15-19 June 2015, Vienna, Austria

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.4 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下 (1)衝突荷重の設定(1/2)

衝突荷重の設定の考え方

- 工学式に基づき、静的解析の入力条件となる落下物の衝突時の荷重を設定
- 落下物として、受入れ区域全体で最大となる区画の天井スラブを想定 (図1参照)
- 天井スラブが金属キャスク頂部に衝突してせん断破壊する場合を想定
 - 天井スラブに対し金属キャスクは剛であり、衝突時に天井スラブが破壊
 - 天井スラブが天井に平行に落下し、金属キャスク頂部フランジ部の外径でせん断破壊して打ち抜かれる場合を想定 (図2, 図3参照)
 - 天井スラブが二次蓋中央部に衝突する場合、二次蓋は一次蓋に接触せず、一次蓋部への影響は小さくなる方向
 - 天井スラブが天井に鉛直に落下する場合、平行に落下する場合に比べ荷重は小さくなると考えられる

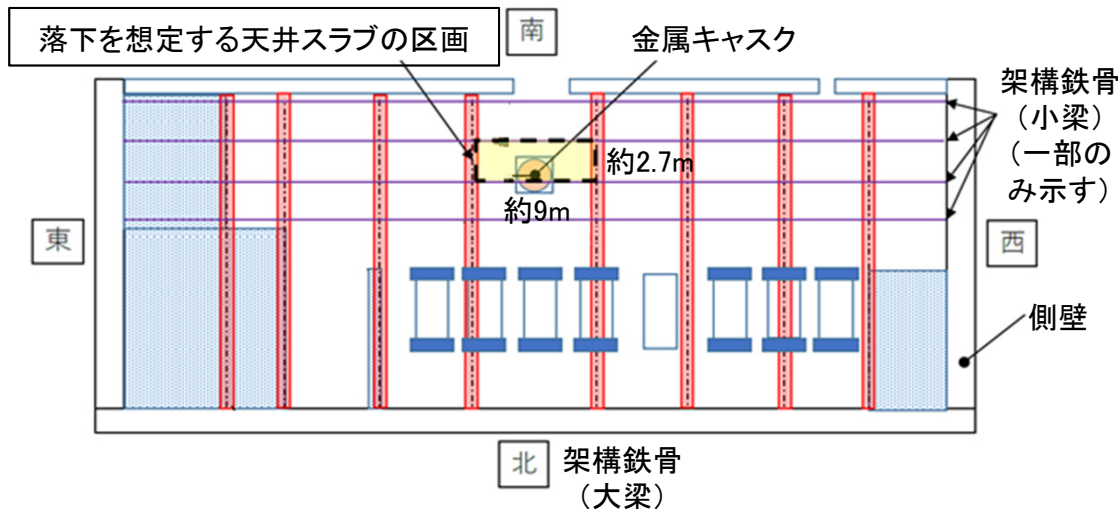


図1 落下を想定する天井スラブ

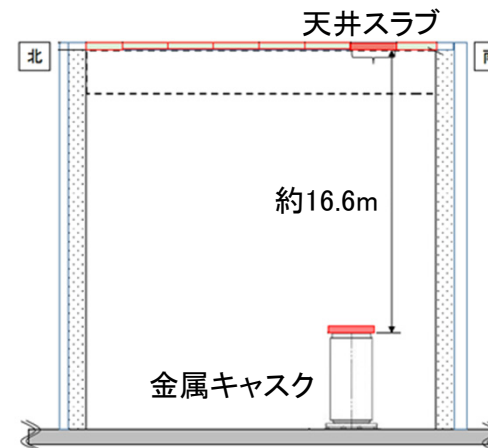


図2 天井スラブと金属キャスクの位置関係

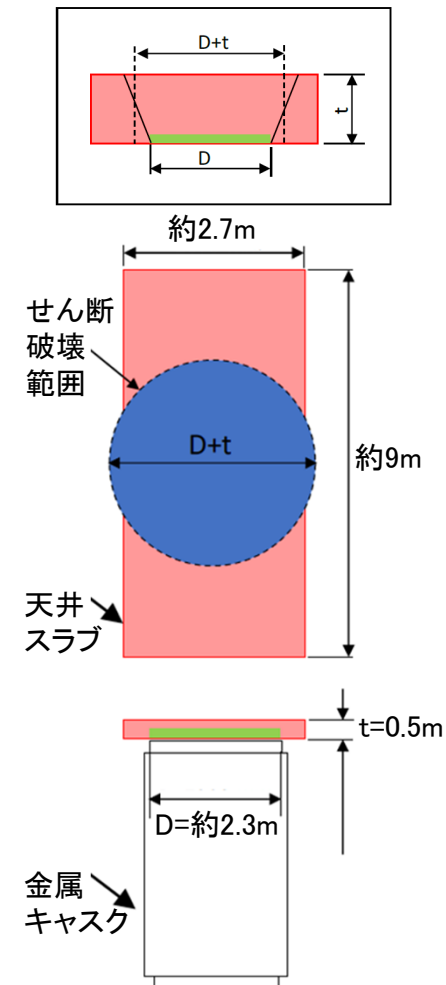


図3 評価モデル(天井スラブがせん断破壊するとした場合)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.4 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下 (1)衝突荷重の設定(2/2)

天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件

項目	数値	備考
落下高さ	16.6m	• 天井スラブの通常時及び金属キャスクへの衝突時の重心高さの差
落下物の衝突速度	18.1m/s	• 天井スラブの落下高さ(上記)に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
落下物の質量	30t	• 受入れ区域全体で最大の区画となる天井スラブの寸法(東西約9m×南北約2.7m×厚さ0.5m)及びコンクリート密度(2.45t/m ³)に基づき設定
金属キャスクフランジ部上面の直径(D)	2.3m	—
天井スラブ厚さ(t)	0.5m	—
天井スラブ強度(σ)	2.4MPa	• 金属キャスクに与える荷重が大きくなるよう、原子力発電所耐震設計技術規定(JEAC4601-2008)の許容せん断応力度(供用状態D)=($1.5F_c/30$)に従って設定(F_c は実強度= $1.4 \times 33\text{MPa}$)

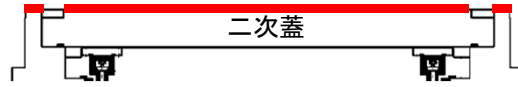
荷重設定の結果

項目	数値	備考
せん断荷重(F_τ)	約11MN	• $F_\tau = \pi \times (D+t) \times t \times \sigma$ により算出 D: 金属キャスクフランジ部上面の直径、t: 天井スラブ厚さ、 σ : 天井スラブ強度

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.4 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下 (2) 静的解析の評価条件

主な評価条件

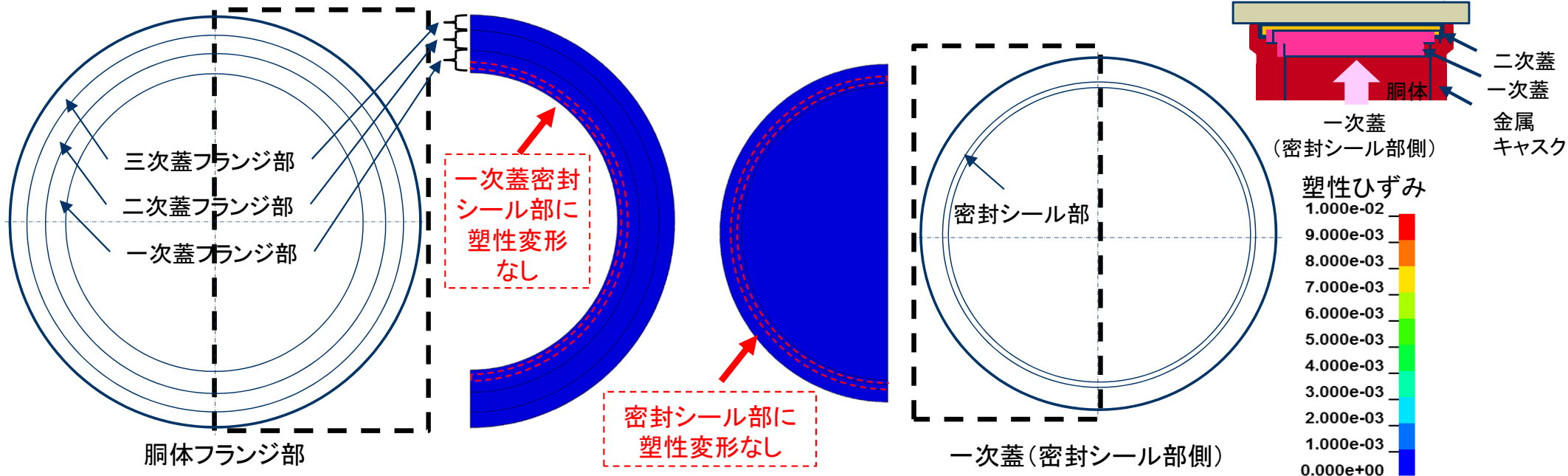
項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS(衝撃・構造解析ソフトウェア)	<ul style="list-style-type: none"> 米国HKS社(現ダッソーシステムズ社)で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード 応力解析、熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ、特に非線形解析が容易に行えることが特徴 金属キャスクの応力解析、発電用原子炉の応力解析(原子炉容器、炉心支持構造物、蒸気発生器等)で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> 荷重11MN 荷重範囲は二次蓋及び二次蓋フランジ部として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重の値(11MN)は衝突荷重の設定結果(2.4(1)参照)に基づく 縦姿勢の金属キャスクへの衝突を考慮し、荷重範囲を金属キャスク頂部とする(右図参照)  <p>衝突荷重分布の与え方(一部に付加)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクは全体形状を模擬 金属キャスクは貯蔵架台上を想定した縦姿勢 金属キャスクの支持部(貯蔵架台)はモデル化せず底部を固定 三次蓋がない状態を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 縦姿勢の金属キャスクは貯蔵架台上にあるが、衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から、支持部(貯蔵架台)の変形は考慮しない 取扱工程上三次蓋がある状態(検査架台まで)とない状態(貯蔵区域への移送時)があるが、密封境界部(一次蓋)への荷重が厳しくなる後者の場合で評価

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.4 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下 (3) 静的解析の評価結果

衝突部の塑性ひずみ

- 胴体フランジ部の一次蓋密封シール部に塑性変形は見られない
- また、一次蓋の密封シール部に塑性変形は見られない



一次蓋用締付ボルトの応力

- 一次蓋用締付ボルトのボルト応力は降伏応力を超えず弾性範囲

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○(約263MPa)	設計降伏点(Sy値) 一次蓋締付ボルト 831MPa

→ 一次蓋の閉じ込め機能が維持されることを確認

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.5 閉じ込め機能の低下による影響 (1)FP放出量評価(1/2)

FP放出量評価条件

- 金属キャスクへの落下物の衝突により漏洩発生に至るためには、複数の条件の重畳が必要
 - ・ 金属キャスク内の多数の燃料棒が破損し、金属キャスク内が正圧となる
 - ・ 落下物の衝突荷重により一次蓋に大きな変位が発生し、蓋部の漏洩率が増加
 - ・ 二次蓋及び三次蓋の閉じ込め機能が喪失
- ここでは様々な仮定によりキャスクからの漏洩が発生する場合を仮定し、以下の条件に基づきFP放出量の評価を実施

事象	金属キャスクへ落下物が衝突し、収納された燃料集合体の燃料棒から気体状FPが金属キャスク内に放出 金属キャスク内が正圧となり、落下物の衝突により一次蓋のシール部から気体状FPが漏洩した状態を仮定
評価対象核種	希ガス(⁸⁵ Kr)及びよう素(¹²⁹ I) (長期冷却後の燃料であることを考慮し、長半減期の気体状核種を選定)
FP生成量	新型8×8ジルコニウムライナ燃料 燃焼度34GWd/t(収納燃料条件(平均燃焼度)) 冷却期間18年(収納燃料条件)
破損燃料体数	金属キャスク1基分の燃料集合体全数(69体)の燃料棒全数の破損を仮定
燃料棒ギャップへのFP移行割合	30%(同種の評価で長半減期の気体状核種に適用されている値)
金属キャスク内に放出されるFP量	希ガス(⁸⁵ Kr): 約 3.8×10^{14} Bq, よう素(¹²⁹ I): 約 4.4×10^9 Bq (=上記FP生成量×破損燃料体数×燃料棒ギャップへのFP移行割合)
金属キャスクからの漏洩量	金属キャスクからの漏洩率: 1×10^{-4} Pa・m ³ /s ・ 落下物の蓋部への衝突による横ずれを考慮して保守的に設定(2.5(2)参照) ・ 横ずれ発生後、時間の経過による漏洩率の回復は考慮しない 金属キャスクの内圧及び温度: 初期状態に対し燃料棒からのFPガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮 ・ 設定した漏洩率に相当する漏洩孔径: 約 1.3×10^{-5} m*1, 漏洩孔長: 約 4.6×10^{-3} m ・ 一次蓋からのガス漏洩率*2(標準状態: 25°C, 1気圧): 約 8.0×10^{-10} m ³ /s 三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮しない
放出期間	3ヶ月(対応措置ないし時間の経過による漏洩率の回復により、漏洩は抑制されるものとする)

*1) 使用済燃料貯蔵施設(中間貯蔵施設)に係る技術検討報告書(資源エネルギー庁, H12.12)に基づき算出

*2) 放出期間(3ヶ月)の平均。なおこの期間内のガス漏洩率の変動は1%未満

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.5 閉じ込め機能の低下による影響 (1)FP放出量評価(2/2)

FP放出量評価結果

- 評価条件(前頁参照)に基づき評価した結果を以下に示す
- 評価結果は、線量評価(2.5(3)参照)の入力として使用

^{85}Kr	約 $3.3 \times 10^{11}\text{Bq}$
^{129}I	約 $3.8 \times 10^6\text{Bq}$

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.5 閉じ込め機能の低下による影響 (2)漏洩率評価(1/2)

漏洩率の設定の考え方

- 動的解析に依存しない方法として、金属キャスクの構造に基づき横ずれ量を設定
 - 金属キャスクの一次蓋や二次蓋の横ずれは、容器本体で制限されるいわゆるインロー構造(図1参照)
 - 一次蓋の横ずれ量は、一次蓋と本体胴フランジの間隙(~2mm程度)に制限
- 金属ガスケットの横ずれ量と漏洩率の関係はこれまで試験による実測データが蓄積されており、これらを踏まえて漏洩率を設定し、プルームによる線量の評価条件として反映
 - 動的横ずれ試験の結果、横ずれ量2mm程度では漏洩率の上限は $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度(図2参照)
 - 試験体のスケール比(約1/10)を見込んで漏洩率を $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定し、FP放出量評価に反映
- なお、横ずれ発生後、時間の経過(数十時間程度)とともに一定程度の漏洩率の回復(概ね2桁以上)(図3, 図4参照)
 - FP放出量の評価条件(横ずれ発生直後の漏洩率を用い、その後の時間の経過による漏洩率の回復は考慮しない)は設定として保守的

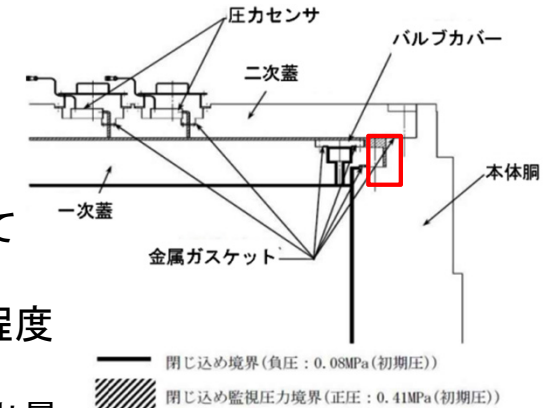


図1 金属キャスクのシール部詳細

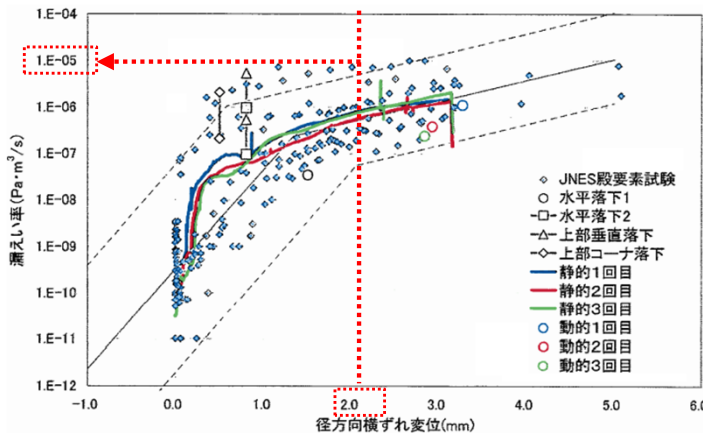


図2 動的横ずれ試験の結果の比較(*1に加筆)
〔衝撃試験機による試験だけでなく、落下試験 (JNES実施)の結果を含めている〕

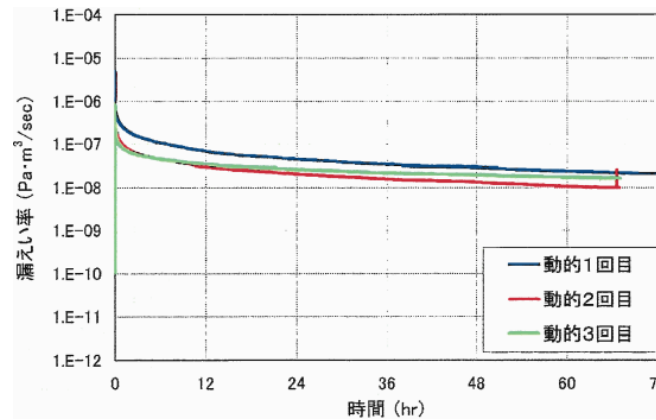


図3 時間の経過による漏洩率の回復(*1)

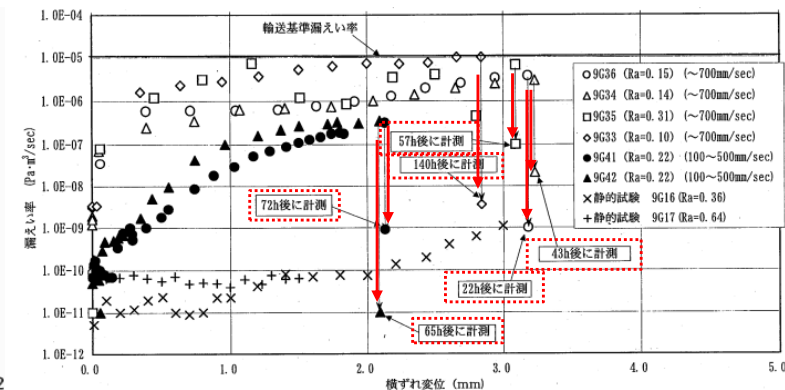


図4 時間の経過による漏洩率の回復(*2に加筆)

*1) 平成19年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵設備長期健全性等確証試験)報告書((財)電力中央研究所, H20.3)

*2) 平成15年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵設備確証試験)報告書((財)原子力発電技術機構, H15.9)

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.5 閉じ込め機能の低下による影響 (2)漏洩率評価(2/2)

(参考)金属ガスケットによる閉じ込めと漏洩率回復の仕組み

- 金属ガスケットは一次蓋に設けられた溝部に取り付けられる締切型(図1参照)
 - 金属ガスケットのつぶし代を考慮して深さを決定
 - 一定量を超えたボルトの締付力は蓋と胴の接触部が受け持つことになるため、金属ガスケットが過度に圧縮変形することはない(図2参照)

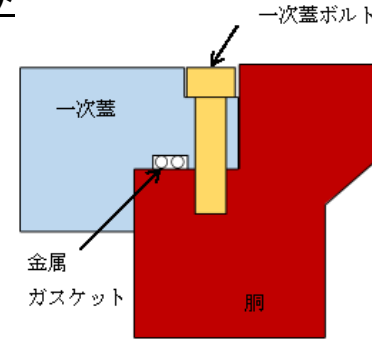


図1 一次蓋フランジ部(模式図)

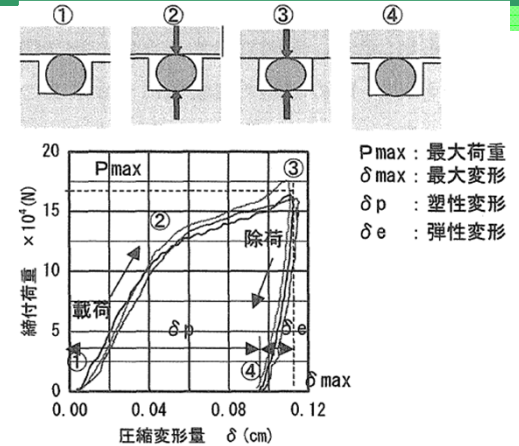


図2 金属ガスケットの圧縮復元特性(*)

- 金属ガスケット部における漏洩は、金属ガスケット表面が蓋や胴のフランジ部に接触する面の微小な隙間に起因(図3参照)
 - 金属ガスケットは、ボルト締付によって所定の締付力とすると、ガスケット表面と対応面(蓋フランジの当たり面、あるいは、キャスク本体の当たり面)との隙間をガスケットに使用されているアルミ材が埋めることによって閉じ込める(図4, 図5参照)
 - そこに荷重が作用すると、一時的に締付力が不足状態になり漏洩率は増加するが、ボルトに発生する応力が弾性範囲内であれば締付力は回復し、ガスケット接触面の状態が初期の状態と同様に隙間をアルミ材が徐々に埋めるため漏洩率は回復すると考えられている

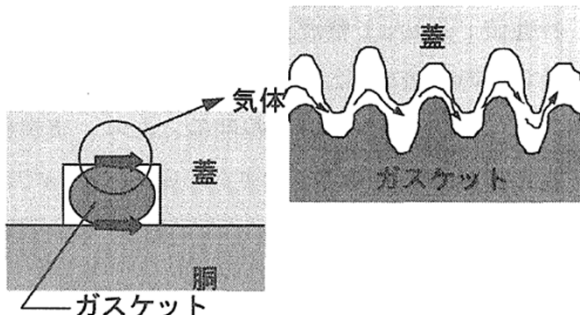


図3 金属ガスケット部における漏洩の概略図(*)

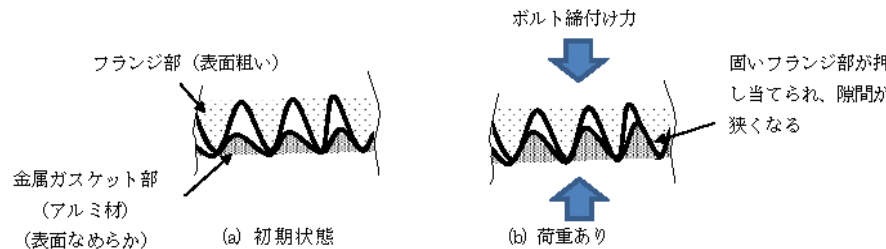


図4 金属ガスケットの締付時の概念図

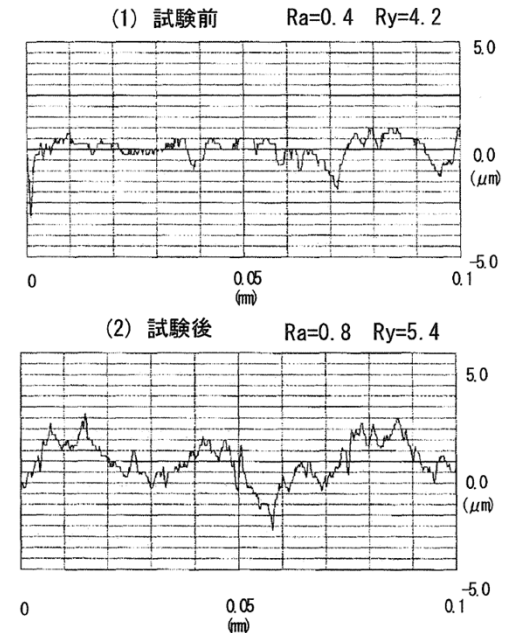


図5 漏洩率測定試験前後の金属ガスケットの表面粗さの比較(*)
〔試験後(締付終了後)の表面粗さ Ra がフランジの表面粗さ $Ra=1.0 \mu m$ にほぼ等しくなっている〕

*) キャスク密封部における接面漏洩評価法の提案 研究報告:U01006((財)電力中央研究所, H13.7)
無断複製・転載禁止リサイクル燃料貯蔵株式会社

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.5 閉じ込め機能の低下による影響 (3)線量評価

2.5(1)で評価したFP放出量に基づく敷地境界での実効線量の評価を、以下の条件に基づき実施
線量評価条件

拡散条件	<p>相対線量(D/Q)及び相対濃度(χ/Q)を、以下の条件に基づき設定 放出箇所: 地上放出 気象条件: 風向固定、風速1m/s、大気安定度F(評価結果が保守的となる条件) 放出時間: 長時間放出(一次蓋部からの緩慢な漏洩であることを考慮) 建屋影響: 非考慮 敷地境界までの距離: 150m(貯蔵建屋受入れ区域北側～北側敷地境界)</p>
線量評価式	<p>外部被ばく(^{85}Kr)による実効線量(Sv): $H_{\text{ex}} = K \times D/Q \times Q_{\text{out}}$ K: 空気カーマから実効線量への換算係数(1Sv/Gy) D/Q: 相対線量($1.6 \times 10^{-17}\text{Gy/Bq}$) Q_{out}: 金属キャスクからの漏洩放射エネルギー(Bq)(γ線実効エネルギー0.5MeV換算値) (^{85}Krのγ線実効エネルギー: 0.0022MeV) 内部被ばく(^{129}I)による実効線量(Sv): $H_{\text{in}} = R \times H \times \chi/Q \times Q_{\text{out}}$ R: 呼吸率($5.16\text{m}^3/\text{d}$: 放出期間が長いことを考慮し、小児1日平均) H: 実効線量への換算係数($2.0 \times 10^{-7}\text{Sv/Bq}$: 小児) χ/Q: 相対濃度($4.2 \times 10^{-3}\text{s/m}^3$) Q_{out}: 金属キャスクからの漏洩放射エネルギー(Bq)</p>

線量評価結果

外部被ばく(^{85}Kr)による実効線量	約 $2.4 \times 10^{-5}\text{mSv}$
内部被ばく(^{129}I)による実効線量	約 $2.0 \times 10^{-4}\text{mSv}$
実効線量合計	約 $2.2 \times 10^{-4}\text{mSv}$

2. 金属キャスクの閉じ込め評価

2.5 閉じ込め機能の低下による影響 (4)パラメータによる影響

(参考)パラメータによる影響

FP放出量評価(2.5(1)参照)の前提とした条件に対し、パラメータを変化させた場合の影響を考察

➤ 漏洩率による影響

- 漏洩率を $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ から $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に増加させた場合の影響を考察
 - ガス漏洩率は約 $8.2 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{s}$ となり、漏洩率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の場合(約 $8.0 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$)の約10倍に増加
 - FP放出量はガス漏洩率にほぼ比例することから、FP放出量は漏洩率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の場合(2.5(1)(2/2)参照)の10倍程度と考えられる
 - 敷地境界での実効線量(2.5(3)参照)についても同様であるが、実効線量は $2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{mSv}$ 程度と考えられる

➤ 燃料破損割合による影響

- 本評価では、金属キャスク1基分の燃料集合体全数(69体)の燃料棒全数の破損を仮定する、極めて保守的な条件を設定
 - 実際には金属キャスクの内部は負圧であり、ある程度の燃料棒の破損が発生しないと金属キャスク内部の負圧が維持され一次蓋からの漏洩が発生しない
- このため、金属キャスク内部が正圧となる燃料棒の破損割合を概算
 - 概算の結果、燃料集合体約18~19体相当となり、金属キャスク1基分の燃料集合体数(69体)の1/4程度を超えなければ、金属キャスク内が正圧とならず、一次蓋からの漏洩が発生しないと考えられる

3. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

(1) 遮蔽評価の条件(1/4)

遮蔽評価の目的

- 貯蔵建屋受入れ区域の損傷及び金属キャスクへの落下物の衝突により遮蔽機能が低下する場合を仮定して敷地境界における線量を評価し、敷地境界の実効線量が1mSv/年を下回ることを確認する

遮蔽評価の条件

項目	条件	備考
解析コード	MCNP-4C(3次元連続エネルギーモンテカルロ法コード)	敷地境界での遮蔽設計評価に用いるコードと同様
断面積ライブラリ	MCNPDLC-200/MCNPDATA	ENDF/B-VIをベースとしてMCNP用に作成された内蔵ライブラリ
実効線量換算係数	ICRP Publication74の前方-後方照射条件(AP)	—
線源条件	キャスク基数は貯蔵区域288基、受入れ区域8基(最大基数) 線源強度はBWR用大型キャスク(タイプ2)の遮蔽評価結果を基に設定	詳細は補足①(3.(1)(2/4))参照
金属キャスクの状態	受入れ区域8基のうち5基については、落下物の衝突による中性子遮蔽材の損傷を仮定	詳細は補足②(3.(1)(3/4))参照
貯蔵建屋の状態	受入れ区域の外壁(北側/東側/西側)及び天井の遮蔽機能喪失を仮定 貯蔵区域に通じる遮蔽扉は開放状態を仮定	受入れ区域は補足③(3.(1)(4/4))参照 遮蔽扉は津波襲来時に開いていた場合を考慮
復旧期間	金属キャスク損傷部の遮蔽性能:3ヶ月 貯蔵区域に通じる遮蔽扉部分の遮蔽性能:1ヶ月	金属キャスク損傷部については、受入れ区域の瓦礫撤去期間(~2ヶ月程度:受入れ区域の建屋物量に基づき解体手順を踏まえて想定)と併せて3ヶ月程度で追加遮蔽体等を設置
線量評価点	北方向の敷地境界(受入れ区域外壁から約150m)	線量の寄与が大きな受入れ区域の金属キャスクに近い、北方向の敷地境界とする(補足④(3.(1)(4/4))参照)

3. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

(1) 遮蔽評価の条件(2/4)

遮蔽評価の条件(補足)

①-1 線源条件(貯蔵区域の金属キャスク)

- 異常事象時の評価であることから、貯蔵建屋の遮蔽設計評価上の保守的な条件とは異なり、金属キャスクの遮蔽評価結果に基づくより現実的な条件を使用

	今回の評価	(参考)貯蔵建屋の遮蔽設計評価
線源	金属キャスク遮蔽評価結果(表面から1m離れた位置における線量当量率が中性子 $26.2 \mu\text{Sv/h}$, γ 線 $51.7 \mu\text{Sv/h}$)と同等になるように設定	金属キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化
評価線質	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線の線質を設定	中性子100%とした場合、 γ 線100%とした場合のそれぞれを評価し、保守的な評価結果を使用
中性子線及び γ 線の表面エネルギースペクトル	同右	コンクリートの透過率が高い包絡スペクトルを設定

①-2 線源条件(受入れ区域の金属キャスク)

- 金属キャスクの中性子遮蔽材の一部が損傷するため、金属キャスクが健全な場合の線量と中性子遮蔽材損傷部からの線量のそれぞれを算出し合算
- 評価条件は①-1と同様に、金属キャスクの遮蔽評価結果に基づくより現実的な条件を使用

	今回の評価	(参考)貯蔵建屋の遮蔽設計評価
線源	金属キャスク遮蔽評価結果における金属キャスク表面線束の積算値を設定 (金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部については、本体胴表面の線束が損傷部から生じているものとして設定)	金属キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化
評価線質	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線の線質を設定	中性子100%とした場合、 γ 線100%とした場合のそれぞれを評価し、保守的な評価結果を使用
中性子線及び γ 線の表面エネルギースペクトル	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線のスペクトルを設定	コンクリートの透過率が高い包絡スペクトルを設定

3. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価 (1) 遮蔽評価の条件(3/4)

遮蔽評価の条件(補足)(続き)

② 金属キャスクの状態

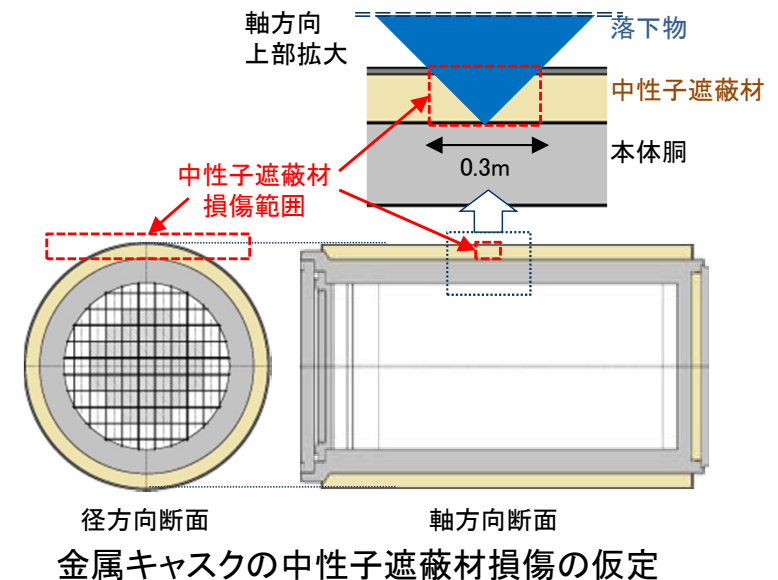
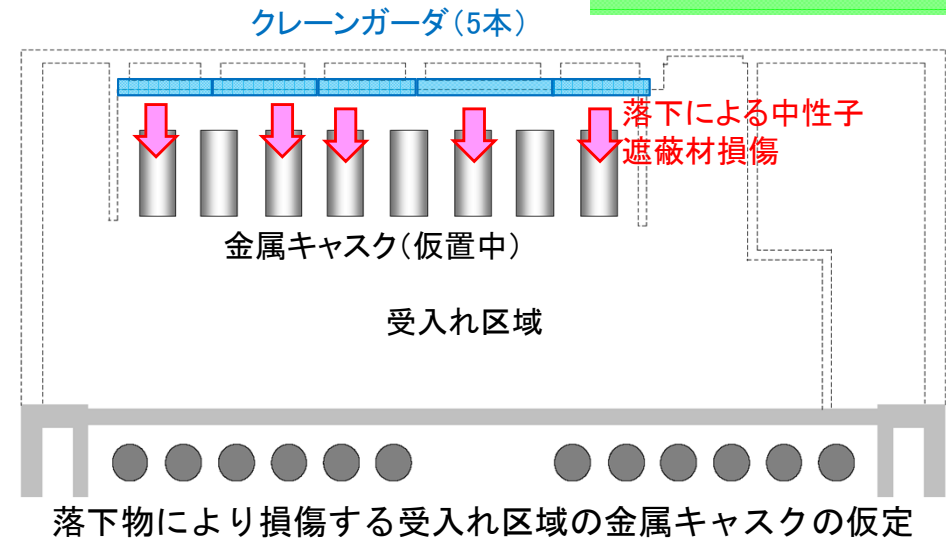
(受入れ区域の金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部)

〔落下物の仮定〕

- 落下物が外筒を貫通して金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷する場合を仮定し、外筒を貫通する可能性のある落下物として抽出した落下物(2.1参照)からクレーンガーダを選定
 - ・ クレーンガーダ上面の走行レールの剛性が高く、落下時に反転して水平状態の金属キャスクの側面へ衝突する状況を仮定すると、外筒を貫通する可能性
 - ・ 閉じ込め評価で想定した落下物(2.1参照)が金属キャスクの外筒を貫通する可能性は小さい(天井クレーンは外筒への衝突で塑性変形、天井スラブは外筒への衝突で破壊)
- クレーンガーダの落下により、5体の金属キャスクの中性子遮蔽材の損傷を仮定
 - ・ クレーンガーダは金属キャスク(仮置中)付近に5本あり、1本が1基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷(右上図参照)
 - ・ 1本のクレーンガーダが同時に複数の金属キャスクに衝突して両者の金属キャスクの中性子遮蔽材が損傷する可能性は小さいと考えられる

〔金属キャスクの中性子遮蔽材損傷の仮定〕

- 落下物の衝突により、水平状態の金属キャスクの上部の中性子遮蔽材が、径方向に平行(東西方向)に幅0.3mで損傷する状態を仮定(右下図参照)
 - ・ クレーンガーダの衝突を念頭に、外筒の貫通が起こりうる状況(落下物の角部が衝突)を仮定
 - ・ 外筒を貫通した落下物は、本体胴で止まるまでに中性子遮蔽材に幅約0.3mの楔形の損傷を発生させると仮定
 - ・ 開口部の幅は約0.3mであり、遮蔽評価上は保守的に方形の損傷を仮定



3. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

(1) 遮蔽評価の条件(4/4)

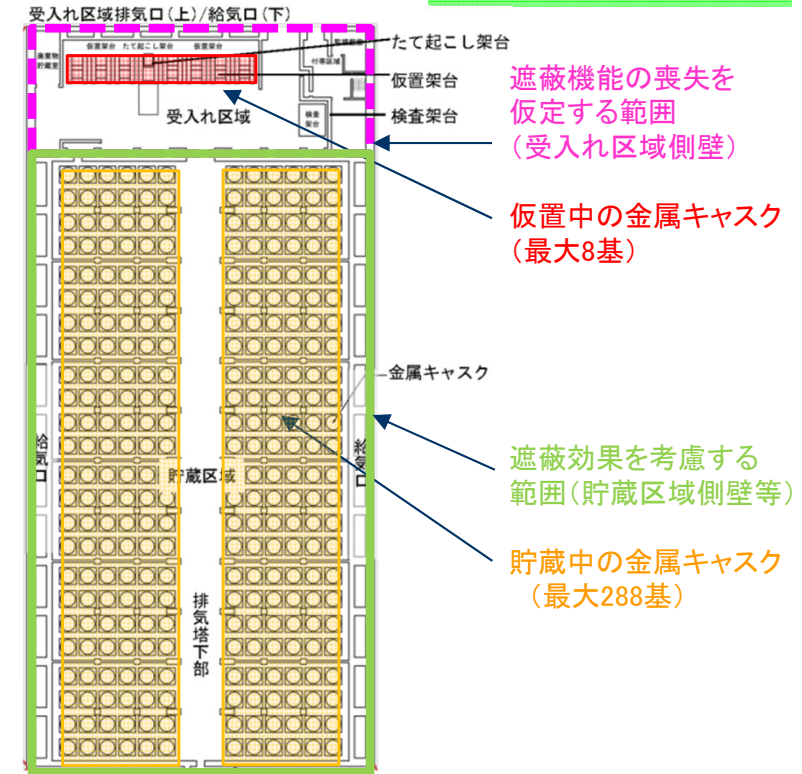
遮蔽評価の条件(補足)(続き)

③ 貯蔵建屋の状態

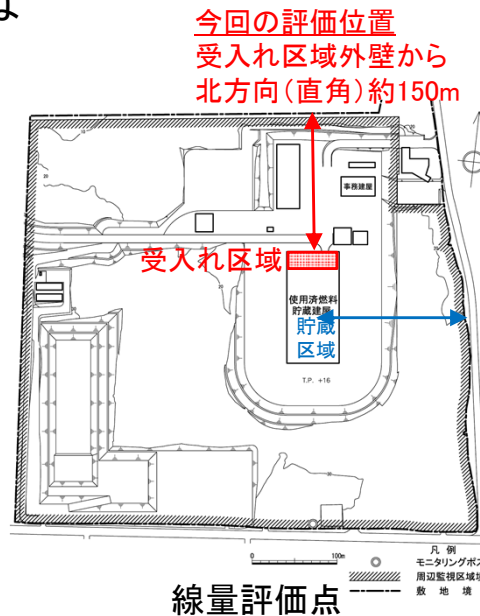
- 貯蔵建屋のうち、受入れ区域の外壁(北側/東側/西側)及び天井の遮蔽機能の喪失を仮定(右図参照)
 - ・ 波圧に対し受入れ区域の北側外壁が許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を仮定
 - ・ 受入れ区域の損傷形態を定量的に評価する上での不確かさが大きいいため、相当に保守的と考えられるが、東側/西側外壁や天井も含めて遮蔽機能の喪失を仮定

④ 線量評価点

- 受入れ区域の金属キャスクからの寄与が大きいため、受入れ区域に近い北方向(受入れ区域外壁から約150m)とする(下図参照)
 - ・ なお、貯蔵建屋の遮蔽設計評価では貯蔵区域からの線量が最大となる東方向(貯蔵区域中心から約170m)で評価



貯蔵建屋における遮蔽の考慮



貯蔵建屋の遮蔽設計
評価の評価位置
貯蔵区域中心から
東方向(直角)約170m

線量評価点

3. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価 (2) 遮蔽評価の結果

線量評価結果は以下に示すとおり、年間1mSvを下回ることを確認した

受入れ区域に存在する金属キャスクからの実効線量(年間)	約 7.6×10^{-1} mSv*
貯蔵区域に存在する金属キャスクからの実効線量(年間)	約 1.9×10^{-2} mSv
実効線量合計(年間)	約 7.8×10^{-1} mSv

*) このうち金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部からの実効線量(年間)は約 1.4×10^{-1} mSv

4. まとめ

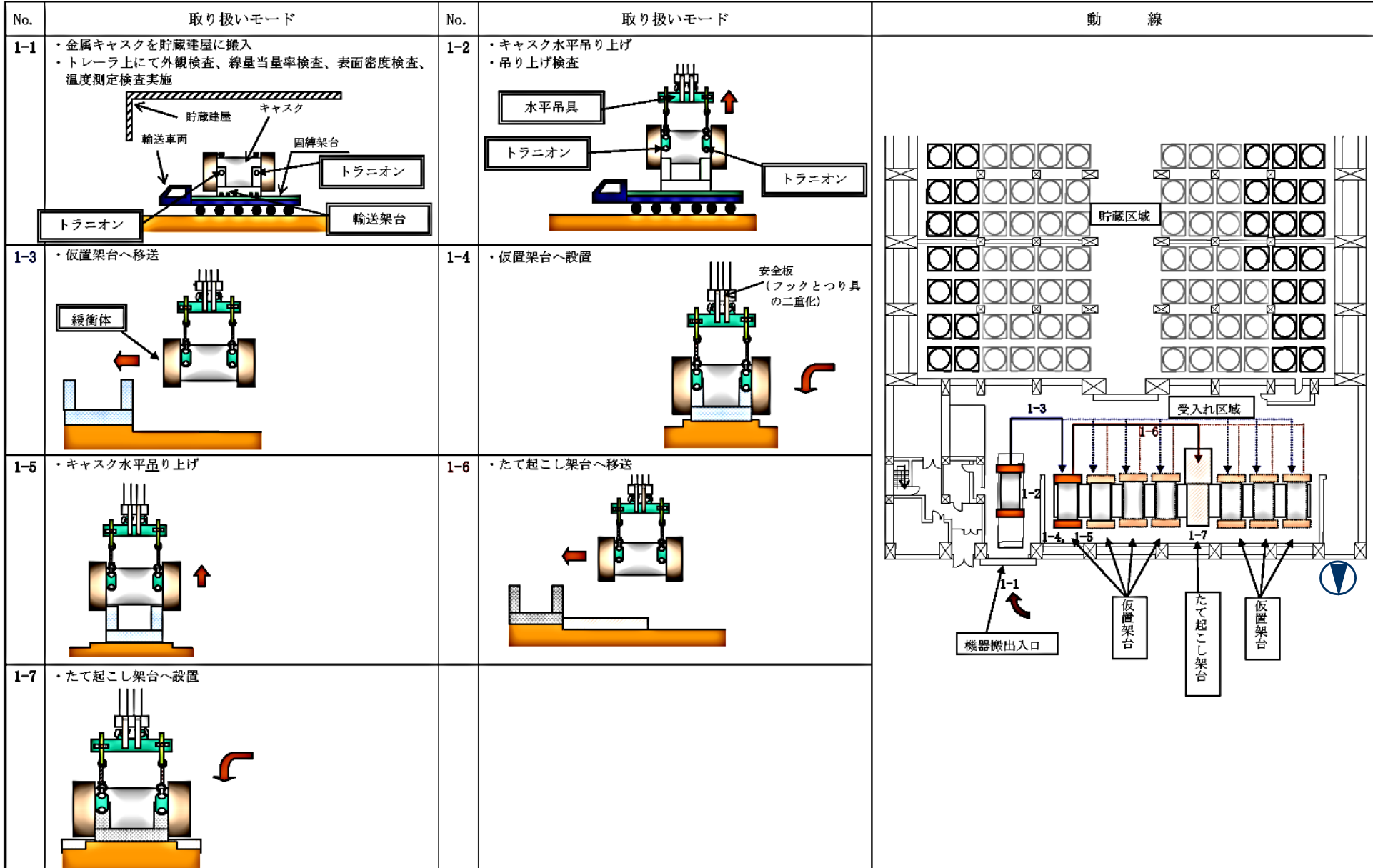
基本的な安全機能維持の確認に係る評価の結果、仮想的な大規模津波に伴う波力による貯蔵建屋受入れ区域の損傷を仮定し、かつ受入れ区域に金属キャスクが仮置きされている一時的な状態を考慮しても、使用済燃料貯蔵施設の基本的な安全機能が維持されることを以下のとおり確認した。

- 閉じ込め機能について、貯蔵建屋受入れ区域の損傷による落下物の衝突を考慮しても金属キャスクの密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認するとともに、落下物の衝突に伴う閉じ込め機能の低下に燃料棒全数の破損を重畳させて金属キャスクからの漏洩を仮定しても、敷地境界における実効線量が十分小さいことを確認した。
- 遮蔽機能について、貯蔵建屋受入れ区域の損傷及び受入れ区域の損傷による落下物の衝突に伴う金属キャスクの遮蔽機能の低下を仮定しても、敷地境界における実効線量が1mSv/年を超えないことを確認した。

【参考】リサイクル燃料備蓄センターにおける金属キャスク取扱工程(1/3)

審査会合(R1.7.29)
資料1-2 p18再掲

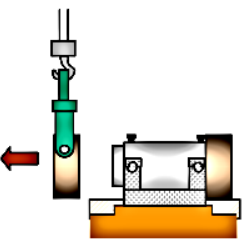
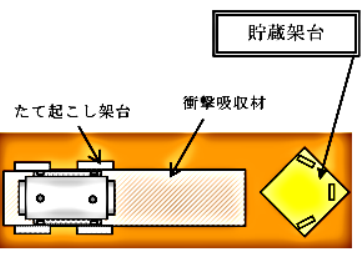
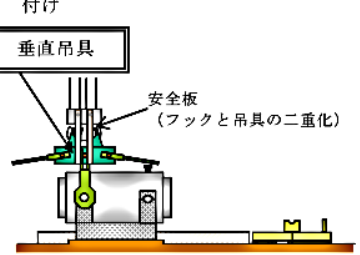
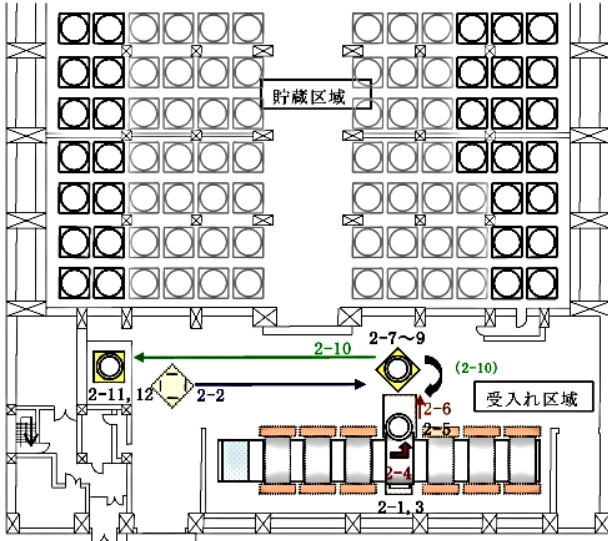
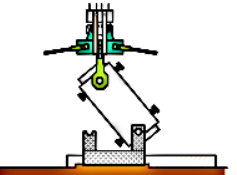
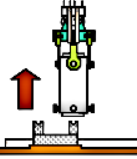
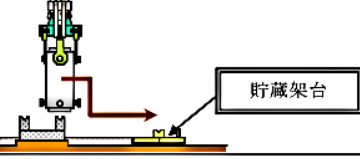
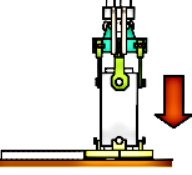
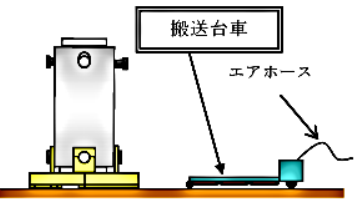
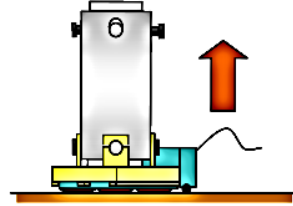
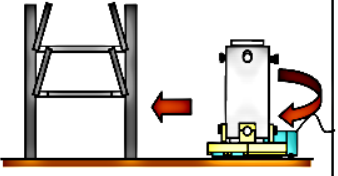
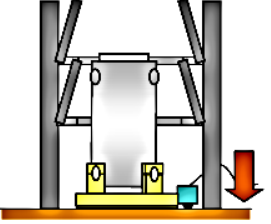
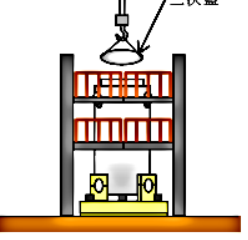
金属キャスク取扱工程(1) 金属キャスクの受け入れ～金属キャスクの仮置き



【参考】リサイクル燃料備蓄センターにおける金属キャスク取扱工程(2/3)

審査会合(R1.7.29)
資料1-2 p19再掲

金属キャスク取扱工程(2) 緩衝体取り外し～金属キャスクたて起こし～検査架台への移送

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動線
2-1	・緩衝体の取り外し 	2-2	・貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置 	2-3	・吊具主アームを上部トランシオンに取り付け 	
2-4	・主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キャスクをたて起し 	2-5	・トランシオン押さえを取り外した後、キャスクを吊上げ ・吊り上げ検査 	2-6	・吊上げ高さを目視にて確認し横行・下降操作を繰り返し、貯蔵架台上まで移送 	
2-7	・キャスクを貯蔵架台に着床、固定 	2-8	・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入 	2-9	・搬送台車浮上 	
2-10	・旋回動作、走行動作により検査架台へ移送 	2-11	・搬送台車着床、貯蔵架台固定ボルト取り付け 	2-12	・三次蓋(輸送用)の取り外し 	

【参考】リサイクル燃料備蓄センターにおける金属キャスク取扱工程(3/3)

審査会合(R1.7.29)
資料1-2 p20再掲

金属キャスク取扱工程(3) 検査架台～貯蔵場所への設置

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動線
3-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蓋間圧力検出器、キャスク表面温度検出器取り付け ・ 気密漏えい検査 ・ 貯蔵架台に搬送台車挿入 ・ 貯蔵架台固定ボルト取り外し 	3-2	・ 搬送台車浮上	3-3	・ 検査架台からキャスク拔出し	
3-4	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵場所まで移送 	3-5	・ 搬送台車の着床・貯蔵架台の設置	3-6	・ 貯蔵架台の固定ボルト一部取り付け	
3-7	<ul style="list-style-type: none"> ・ 搬送台車の抜取り 	3-8	・ 貯蔵架台の固定ボルト取り付け・確認	3-9	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面温度及び蓋間圧力端子箱へケーブル接続 ・ 二重蓋間圧力検査、表面温度検査、据付検査 	