

V - 3

計算機プログラム(解析コード)の概要

目 次

	ページ
1. はじめに	1
別紙 1 ANSYS	1-1
別紙 2 ABAQUS	2-1
別紙 3 LS-DYNA	3-1

1. はじめに

本資料は、「V 強度及び耐食性に関する説明書」において使用した解析コードについて説明するものである。

「V 強度及び耐食性に関する説明書」において使用した解析コードの使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

別紙1 ANSYS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-3-1 -22	高レベル廃液混合槽	13.0
V-2-3-1 -23	供給液槽	13.0
V-2-3-1 -24	供給槽	13.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ANSYS
開発機関	Swanson Analysis Systems 社
開発時期	1970 年
使用したバージョン	13.0
使用目的	有限要素法による応力解析
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> ANSYS（以下、「本解析コード」という。）は、米国 Swanson Analysis Systems 社(現, Ansys 社)によって開発された汎用有限要素法解析ツールである。 本解析コードは、構造・伝熱・電磁場・熱流体といった様々な物理現象や、それらを組み合わせた連成問題を、目的に合わせて柔軟に解析することができるマルチフィジックス解析ツールである。 数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、機械、建築、土木などの様々な分野で利用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、高レベル廃液混合槽 A/B, 供給液槽 A/B, 供給槽 A の底板の 3 次元有限要素法（シェル要素，軸対称）による応力解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 開発元において多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されており、構造解析における一般的知見により解を求めることが出来る体系について、本解析コードによる解析解が理論解と一致することが確認されている。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 使用したバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されている。本解析コードは、原子力分野では、原子炉設置(変更)許可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績があることを確認している。

別紙2 ABAQUS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-3-1-4	リサイクル槽 A,B	Ver. 2018
V-2-3-1-5	計量・調整槽	Ver. 2018
V-2-3-1-25	安全冷却水冷却塔	Ver. 2018

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ABAQUS
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年 (Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc) 2005年 (ダッソー・システムズ株式会社)
使用したバージョン	Ver. 2018
使用目的	3次元有限要素法 (シェルモデル・ソリッドモデル) による 耐圧解析
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> ABAQUS (以下, 「本解析コード」という。) は, 米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc (HKS 社) で開発され, 現在はダッソー・システムズ社(株)によって保守されている有限要素法による構造解析汎用コードである。応力解析, 熱応力解析, 伝熱解析等を行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴である。 数多くの研究期間や企業において, 航空宇宙, 自動車, 造船, 機械, 建築, 土木などの様々な分野の構造解析に広く利用されている。

<p style="text-align: center;"> 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) </p>	<p>本解析コードは、リサイクル槽 A,B 及び計量・調整槽の 3次元有限要素法（シェルモデル），安全冷却水 A 冷却塔における冷却塔管束ヘッダの 3次元有限要素法（ソリッドモデル）による耐圧解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証は以下のとおり実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた 3次元有限要素法による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認は以下のとおり実施している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検証の体系と今回申請で使用する体系が同等であることから，検証結果をもって解析機能の妥当性も確認できる。 ・ 九州電力株式会社「玄海 3 号機 原子炉容器上部ふた取替工事」における原子炉容器，関西電力株式会社「大飯 3 号機 加圧器スプレイライン配管修繕工事」における 1 次冷却材管の 3次元有限要素法による応力解析に本解析コードが使用された実績がある。 ・ 本解析コードの適用制限として使用要素数があるが，使用した要素数は適用制限以下であり，本申請における使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。
--	--

別紙3 LS-DYNA

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-3-1-6	溶解液中間貯槽	R8.0.0
V-2-3-1-8	抽出廃液中間貯槽	
V-2-3-1-11	プルトニウム溶液受槽, プルトニウム溶液中間貯槽, 第2一時貯留処理槽	
V-2-3-1-17	第1高性能粒子フィルタ A, B, C	
V-2-3-1-18	セル導出ユニットフィルタ	
V-2-3-1-19	セル導出ユニットフィルタ	
V-2-3-1-20	セル導出ユニットフィルタ	
V-2-3-1-21	第1, 第2高レベル濃縮廃液一時貯槽	
V-2-3-1-5	計量・調整槽	R8.1.0
V-2-3-1-7	溶解液供給槽	
V-2-3-1-9	溶解液供給槽デミスタ	
V-2-3-1-10	プルトニウム溶液受槽デミスタ	R11.0.0
V-2-3-1-12	プルトニウム溶液供給槽	
V-2-3-1-13	プルトニウム濃縮液受槽デミスタ	
V-2-3-1-14	第2一時貯留処理槽デミスタ	
V-2-3-1-15	第3一時貯留処理槽デミスタ	
V-2-3-1-16	硝酸プルトニウム貯槽	

2. 解析コードの概要

コード名 項目	LS-DYNA
開発機関	Livermore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	LS-DYNA R8.0.0, R8.1.0 及び R11.0.0
使用目的	水素爆発の発生を仮定する機器の気相部における水素爆発時の影響評価
コードの概要	LS-DYNA は Lawrence Livermore 研究所により開発・公開された陽解法有限要素法 DYN3D を基に開発された構造解析用汎用コードである。機械・土木・建築その他広範な分野に及ぶ要素群、非線形モデルを多数サポートしており、自動車、航空宇宙、機械、建築、土木などの様々な分野において多くの利用実績があり、陽的時間積分を用いていることから、衝突問題など短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また、大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 開発機関がマニュアルにおいて提示している 3次元有限要素法による衝突解析および大変形解析に関する例題解析を実施し、解析結果が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。 はりの衝撃曲げ、平板の衝撃曲げ、応力波伝播に関する検証解析を実施し、解析結果と理論解が一致することを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、自動車、航空宇宙、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。 設工認申請で行う 3次元有限要素（シェル要素、ソリッド要素）による動的解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 実機貯槽を模擬した水素爆発実証試験から得られる圧力波と同等の包含波形を LS-DYNA に入力し、解析を行った結果、（弾性範囲内の試験結果で応力を比較）、同程度の相当応力となり、LS-DYNA を適用することは妥当であることを確認している。

V-3 別紙

水素爆発時の機器の経路維持機能を確認する弾塑性解析へのLS-DYNAの適用性について

目 次

	ページ
1. 概要	1
2. 適用対象事象及び適用実績	1
2.1. 適用対象事象	1
2.2. 適用実績	1
3. 水素爆発試験を用いた検証	2
3.1. 試験内容	2
3.2. 試験結果	6
4. LS-DYNA を用いた解析	8
4.1. 燃焼解析	9
4.2. 弾塑性解析	12
5. 試験と解析の比較	13
6. 結論	13
7. 参考文献	13

1. 概要

本資料は、水素爆発の発生を仮定する機器の気相部における水素爆発時の動的弾塑性解析に用いる LS-DYNA について、適用対象事象及び適用実績並びに水素爆発試験との比較による適用性の確認について説明するものである。

2. 適用対象事象及び適用実績

LS-DYNA は、水素爆発の発生を仮定する機器の気相部において水素爆発を想定した場合、水素爆発を想定する機器への発生応力を評価するために使用する。

2.1. 適用対象事象

重大事故時に水素爆発の発生を仮定する機器は、水素爆発未然防止濃度である 8vol% を超えないように設計しており、水素爆発が発生する可能性は極めて低いと考えられる。しかし、水素爆発の発生を仮定する機器の気相部における水素濃度ドライ換算 12vol% で爆燃が発生した場合による瞬間的に上昇する圧力の影響を考慮しても、機器及びセル導出設備の放射性物質を放出経路内に閉じ込める機能を確保できることを確認することは、放射性物質の環境への放出を可能な限り低くするために非常に重要である。

水素爆発時の圧力時刻歴は、実機貯槽を模擬した水素爆発実証試験にて得られた圧力波、公開文献より確認できる圧力波を参考として、これらの圧力波を包含可能な 0.5MPa をピークとする三角波として設定する。本圧力波を入力条件として与え、水素爆発の発生を仮定する機器への発生応力を評価する。

2.2. 適用実績

LS-DYNA の適用実績は、原子力発電所における格納容器破損モード「原子炉圧力容器外の熔融燃料-冷却材相互作用」の解析結果をまとめた資料である「解析コード (LS-DYNA) 説明資料 (参考資料)」¹⁾ に記している。本節では、当該資料に記載される内容のうち、水素爆発と現象が類似する事項について引用又は参考とし、記載する。

LS-DYNA は、ローレンスリバモア国立研究所で開発された DYNA3D コードに基づき、リバモアソフトウェアテクノロジー社が開発した汎用有限要素解析コードである。

LS-DYNA は、自動車製造分野への適用を主目的として開発されているが、時間とともに接触条件や構造物形状が変化するような非線形解析が可能であり、衝撃や爆発的燃焼による圧力伝播、構造物の塑性ひずみ、健全性の解析に対応している。このため、自動車産業に限らず、航空宇宙、防衛、電気機器、建設・土木分野等にも応用されており、再処理工場の放射性物質を内蔵する機器において水素爆発が発生した際の機器の構造材への荷重応答評価にも適していると言える。

原子力分野における水素爆発に伴う衝撃荷重の構造材応答評価に LS-DYNA を適用した事例はとして、BWR 配管における混合ガス (水素・酸素) の燃焼による配管健全性評価が挙げられる。

本評価では、BWR 配管の主蒸気の放射線分解により生じる可燃性混合ガス (水素・酸素)

の燃焼による配管内での爆轟を模擬した強度試験に対し、LS-DYNA コードにより試験模擬解析を実施している。LS-DYNA による強度解析は、試験体の周方向ひずみを良好に再現することが確認されている。

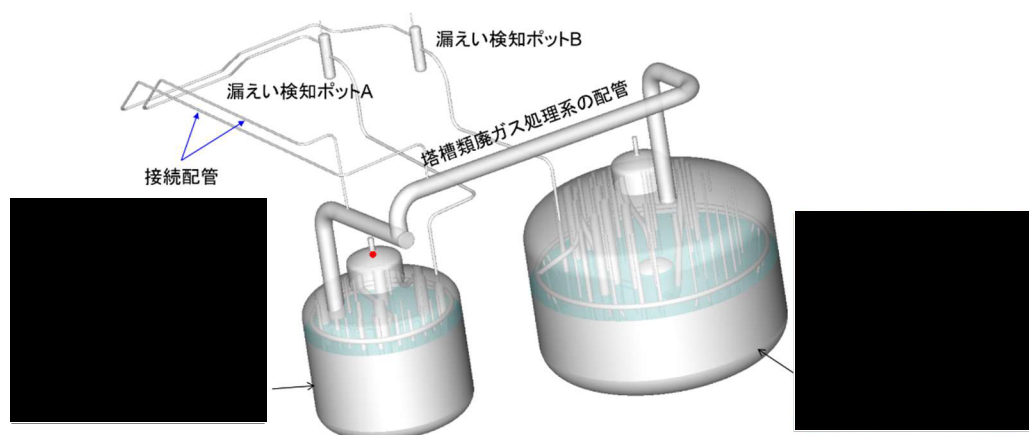
3. 水素爆発試験を用いた検証

再処理工場に設置される機器を実規模スケールで模擬した容器を用いて、水素爆発試験を行っている。円筒貯槽を模擬した試験におけるひずみ量測定結果を用いて、LS-DYNA の水素爆発への適用性を確認する。

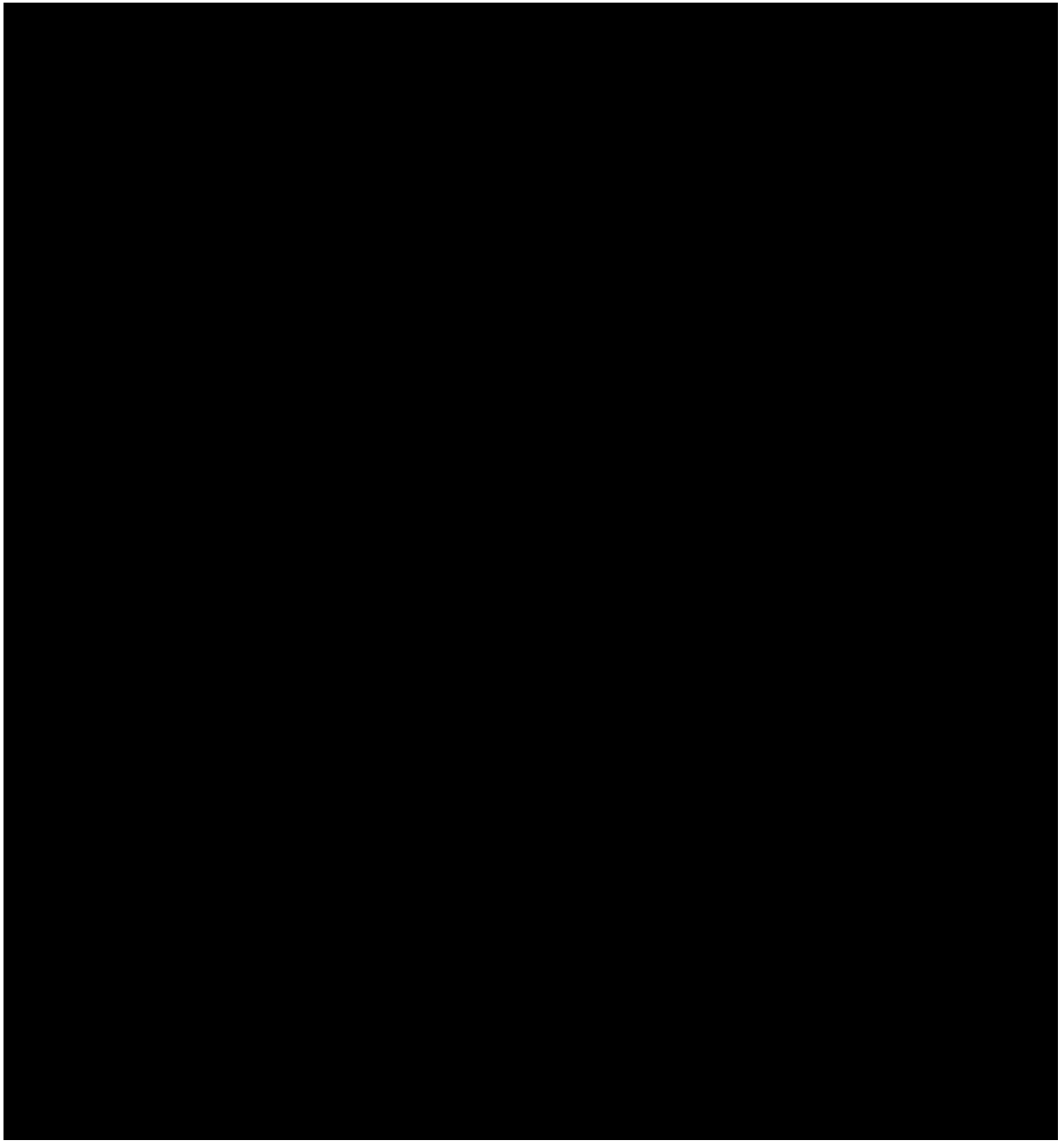
3.1. 試験内容

3.1.1. 試験容器

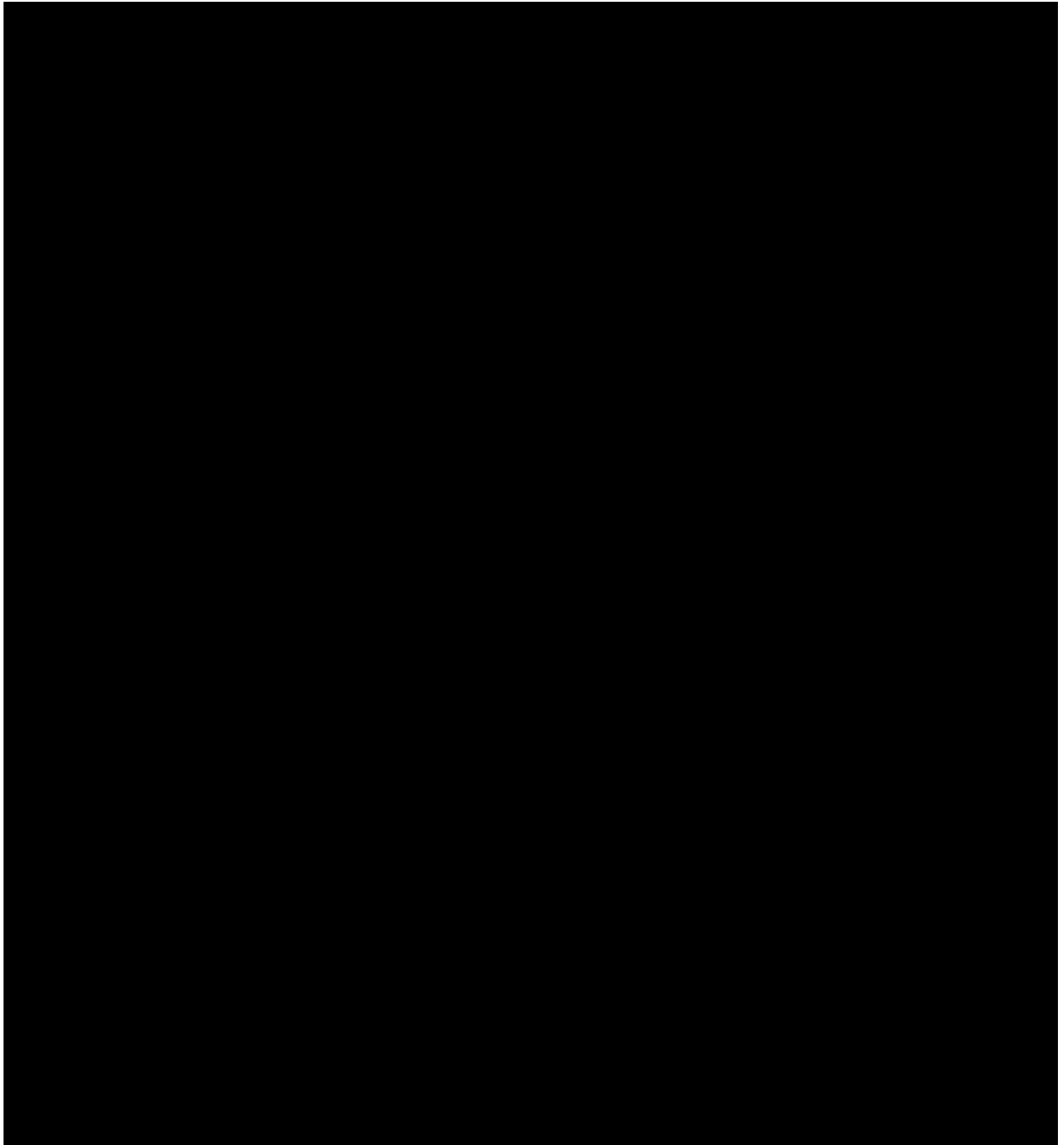
試験容器は、清澄・計量設備のリサイクル槽及び不溶解残渣回収槽を模擬している。全体概要図を第 3.1.1-1 図に示す。水素の燃焼挙動は障害物によって大きく変化するため、水素が蓄積する試験容器の空間部は、計装配管、サポート等の構造物を可能な限り忠実に模擬し設置することで、現実的な水素の燃焼挙動となるように設計した。水素の着火は、リサイクル槽側で行う。水素の着火には、放電型着火装置を用いた。ひずみの測定には、周方向、鉛直方向及びその中間の 45° 方向の 3 軸を測定できるひずみゲージを用いた。圧力の測定には、汎用圧力変換器を壁面に設置し用いた。溶液の深さは 1 m としている。試験容器並びに着火装置、圧力変換器及びひずみゲージの仕様をそれぞれ第 3.1.1-1 表及び第 3.1.1-2 表に示す。また、圧力変換器の位置を図 2 に、ひずみゲージの位置を第 3.1.1-2 図に示す。



第 3.1.1-1 図 試験容器全体概要図



第 3.1.1-2 図 压力变换器位置

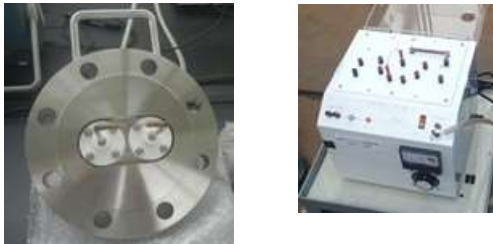

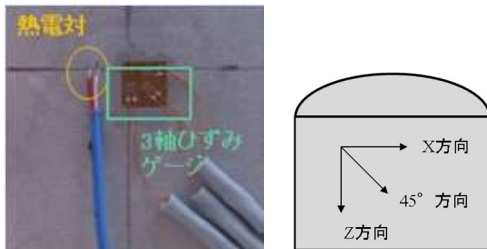


第 3.1.1-3 図 ひずみゲージ位置

第 3.1.1-1 表 試験装置の仕様

模擬対象機器		リサイクル槽 B	不溶解残渣回収槽 B
容積	全容量		
	有効容量 (水相部)		
	気相部体積		
質量	空質量		
	運転質量		
材質			

第 3.1.1-2 表 着火装置及びひずみゲージの外観および仕様

外観	仕様
<p>着火装置 放電ユニット及び着火エネルギー測定器</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・電圧 6~15kV ・静電容量 100pF/300pF/1000pF/2500pF/5000pF ・着火エネルギー 0.3~1900mJ <p>【参考】本試験の設定値は 100mJ または 500mJ</p>
<p>圧力計</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・最大測定圧力 : 3.45MPa ・分解能 : 0.014kPa ・立ち上がり時間 : 1.0μs 未満 ・サンプリング間隔 : 10μs
<p>ひずみゲージ</p> 	<p>最大測定ひずみ 3% (30000μstrain)</p> <p>【参考】 SUS304 の弾性ひずみ限界 2000μstrain</p> <p>サンプリング間隔 10μs</p>

3.1.2. 試験条件

火炎は2つの貯槽をつなぐ塔槽類廃ガス処理設備を模擬した配管を介して不溶解残渣回収槽へ伝播すると考えられるが、ここでは着火側のリサイクル槽に着目する。

試験は、容器内の水素濃度を約 12vol%均一とし、リサイクル槽に設置した着火装置により着火エネルギー100mJ で水素に着火することで行う。試験条件を第 3.1.2-1 表に示す。試験は4回行い、それぞれ n1~n4 と称する。試験 n3 の着火エネルギーは、着火エネルギーがひずみ量に与える影響を確認するために、500mJ としている。

第 3.1.2-1 表 試験条件

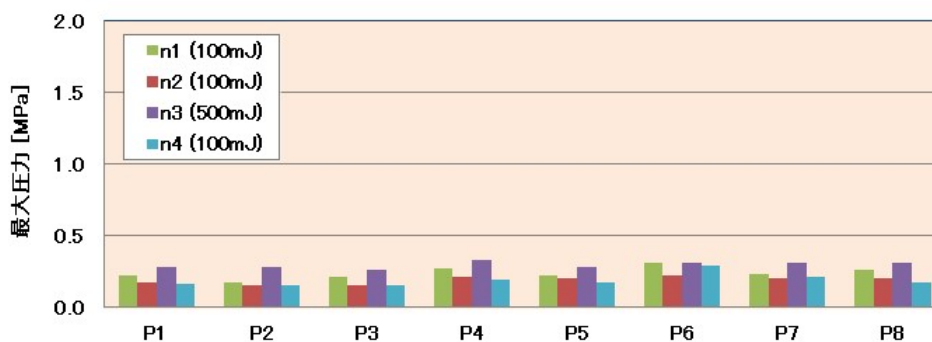
試験項目		n1	n2	n3	n4
水素濃度	設定値	12vol% (空気 88vol%)			
	実測値 (給気側)	12.4vol%	12.6vol%	12.2vol%	12.5vol%
着火 エネルギー		100mJ	100mJ	500mJ	100mJ
水温		25℃	22℃	20℃	20℃
気温		24.1℃	17.4℃	21.9℃	19.5℃

3.2. 試験結果

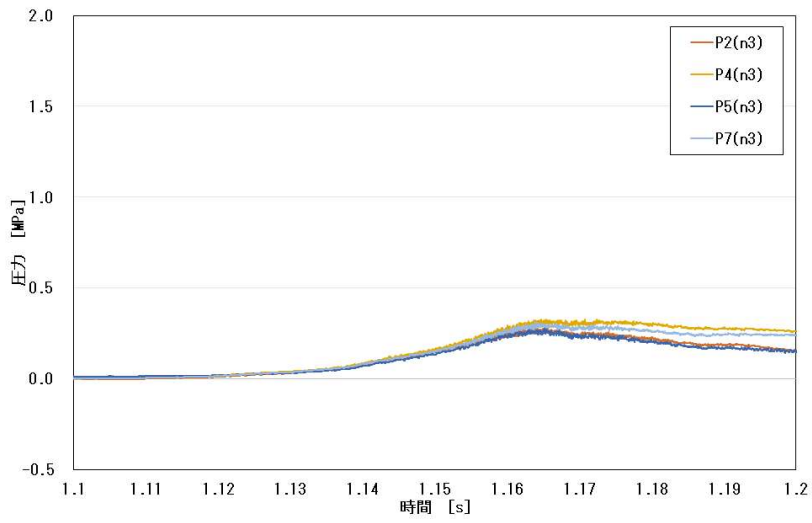
3.2.1. 圧力

水素爆発時のリサイクル槽内の圧力を測定した。最大圧力を第 3.2.1-1 図に、圧力時刻歴を第 3.2.1-2 図及び第 3.2.1-3 図に示す。

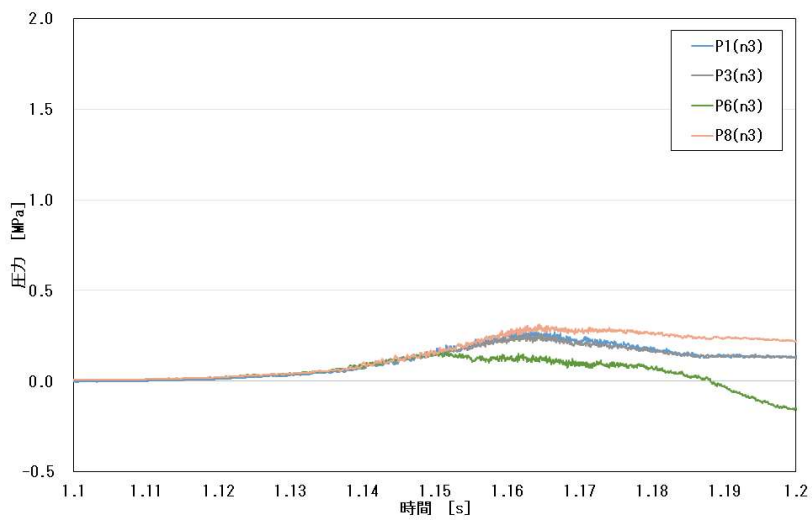
最大圧力は 0.3MPa 程度であった。圧力のピークは観測されず、穏やかな山なりの時刻歴であった。



第 3.2.1-1 図 最大圧力



第 3. 2. 1-2 図 鏡板の圧力時刻歴

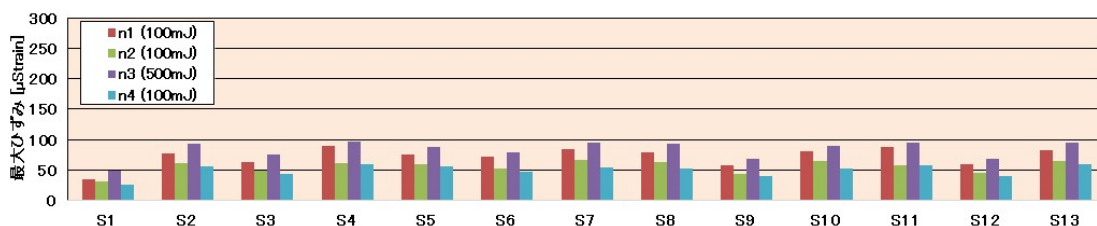


第 3. 2. 1-3 図 円筒胴側面の圧力時刻歴

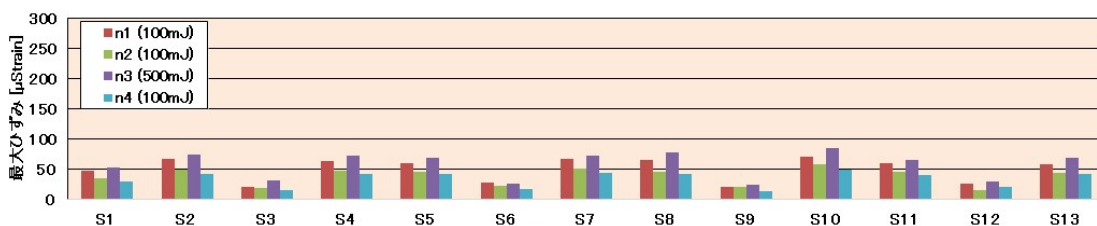
3.2.2. ひずみ

水素爆発時の各ひずみゲージのひずみ量を測定した。ひずみ量は前述のとおり，周方向，鉛直方向及びその中間の 45° 方向について測定した。結果をそれぞれ第 3.2.2-1 図～第 3.2.2-3 図に示す。

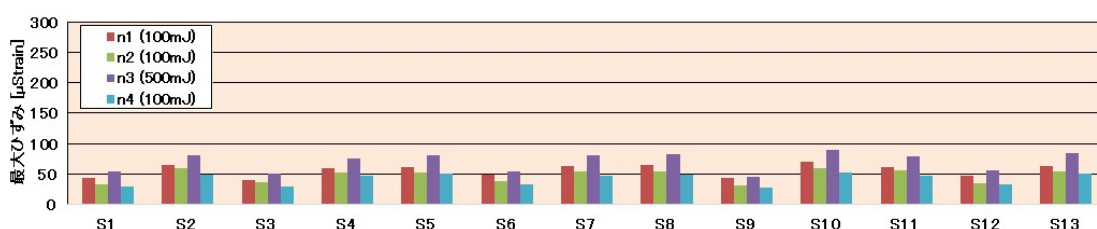
最大ひずみは，100 μ strain 程度であった。また，全センサーにおいて弾性範囲内であり，変形がないことを確認した。



第 3.2.2-1 図 周方向のひずみ量



第 3.2.2-2 図 鉛直方向のひずみ量



第 3.2.2-3 図 45° 方向のひずみ量

4. LS-DYNA を用いた解析

LS-DYNA で圧力時刻歴を考慮した弾塑性解析を行うためには，すべてのメッシュに圧力波を入力する必要がある。測定点が限られる試験結果だけでは，入力情報が不足する。このため，燃焼解析により試験と類似の圧力時刻歴を得て，すべてのメッシュに対する圧力時刻歴を整備する。

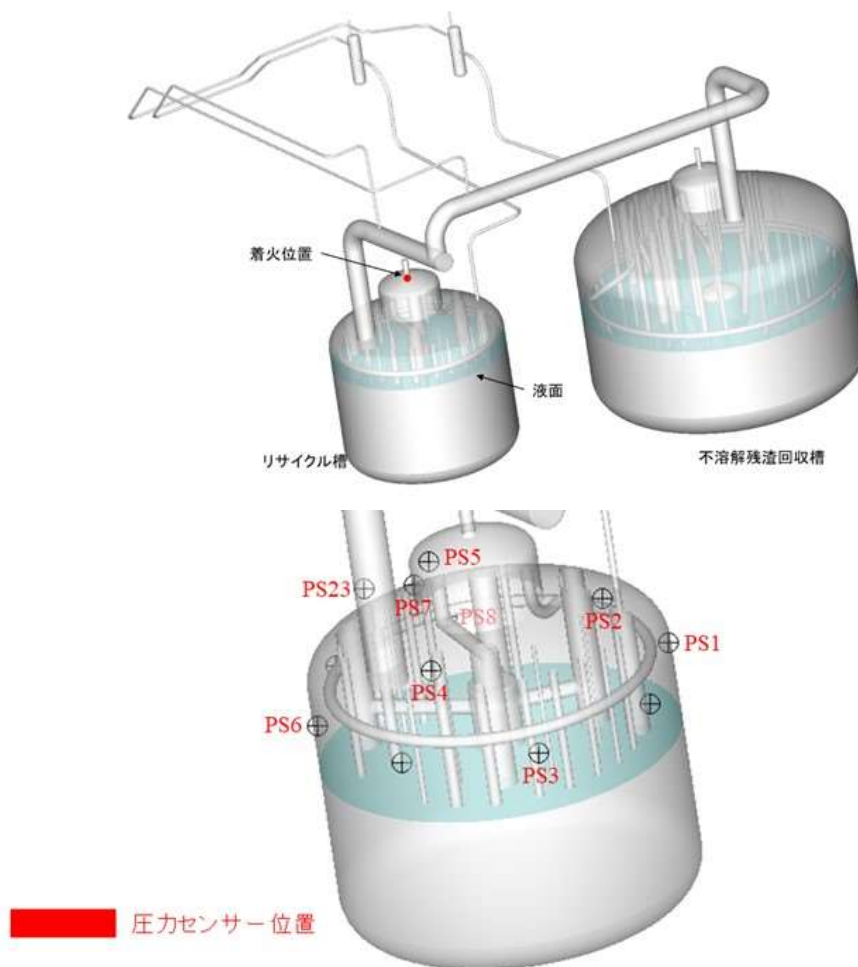
試験装置と同様の三次元モデルを作成し，燃焼解析を行った。燃焼解析から得られる圧力

時刻歴が、試験結果と同等か上回ることを確認した上で、これを LS-DYNA のインプットとして弾塑性解析を行う。

4.1. 燃焼解析

4.1.1. 解析モデル

解析モデルは、内部構造物含めて実規模試験と同様の形状とした。容器内の水もモデル化し、流動性及び圧縮性を考慮する。圧力計の位置は、実規模試験の位置と同様になるように設定した。解析モデルを第 4.1.1-1 図に示す。



第 4.1.1-1 図 解析モデル全体（上図）と圧力計位置（下図）

4.1.2. 解析条件

機器内の水素濃度は 12vol%均一とした。機器及び配管の壁面は断熱として扱い、解析対象は密封系とした。解析に用いた物性値を第 4.1.2-1 表、第 4.1.2-2 表及び第 4.1.2-3 表に示す。

第 4.1.2-1 表 固体の物性値

材質(物質)	物性種別	単位	物性値($y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gx^6$)						
			定数(a)	係数1(b)	係数2(c)	係数3(d)	係数4(e)	係数5(f)	係数6(g)
SUS304	密度 ^{※1}	kg/m ³	7920						
	熱伝導率 ^{※1}	W/(m-K)	19.482	-0.027153	0.000059772	-2.64E-08			
	比熱 ^{※1}	J/(kg-K)	608.77	-0.80217	0.0017377	-8.9993E-07			

※1 出典:伝熱ハンドブック 日本機械学会(2007年)

第 4.1.2-2 表 気体の物性値

材質(物質)	物性種別	単位	物性値($y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gx^6$)						
			定数(a)	係数1(b)	係数2(c)	係数3(d)	係数4(e)	係数5(f)	係数6(g)
H2	比熱 ^{※1}	J/(kg-K)	3.9594E+02	9.2135E+01	-2.1442E-01	2.3290E-04	-1.2588E-07	3.2550E-11	-3.1195E-15
	熱伝導率 ^{※1}	W/(m-K)	-0.65079	0.0057742	-1.4109E-05	1.6885E-08	-9.9351E-12	2.7485E-15	-2.7673E-19
	粘性 ^{※1}	kg/(m-s)	4.7443E-07	3.2799E-08	-1.8219E-11	6.3334E-15	-7.5221E-19		
N2	比熱 ^{※1}	J/(kg-K)	1117.6	-0.56127	0.001241	-8.0902E-07	1.7902E-10		
	熱伝導率 ^{※1}	W/(m-K)	0.0050975	0.000073855	-1.5717E-08	6.3593E-12	-2.2978E-15	3.5078E-19	
	粘性 ^{※1}	kg/(m-s)	4.8085E-06	4.7738E-08	-1.3091E-11	2.1102E-15			
O2	比熱 ^{※1}	J/(kg-K)	922.34	-0.28262	0.001213	-1.0464E-06	2.8617E-10		
	熱伝導率 ^{※1}	W/(m-K)	-0.3506	0.0024647	-5.5178E-06	5.7896E-09	-3.0081E-12	7.4509E-16	-6.8825E-20
	粘性 ^{※1}	kg/(m-s)	1.5463E-06	7.1547E-08	-3.1267E-11	8.0622E-15	-6.5485E-19		
H2O(水蒸気)	比熱 ^{※2}	J/(kg-K)	-2752.3	29.037	-0.062814	0.000063738	-3.2402E-08	7.9976E-12	-7.4238E-16
	比熱(改良後) ^{※3}	J/(kg-K)	1.5233E+03	6.4268E+00	-2.2315E-02	3.0670E-05	-1.8926E-08	5.3286E-12	-5.3780E-16
	熱伝導率 ^{※2}	W/(m-K)	-0.71906	0.0049248	-1.1707E-05	1.3094E-08	-7.2006E-12	1.8768E-15	-1.8105E-19
	粘性 ^{※2}	kg/(m-s)	3.1771E-06	4.6159E-09	7.5904E-11	-7.1136E-14	3.1083E-17	-6.6871E-21	5.6072E-25

※1 出典: Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases (Moscow Aviation Institute)

※2 出典: International Steam Tables - Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97

Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases (Moscow Aviation Institute)

※3 出典: International Steam Tables - Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97

Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases (Moscow Aviation Institute)

第 4.1.2-3 表 液体の物性値

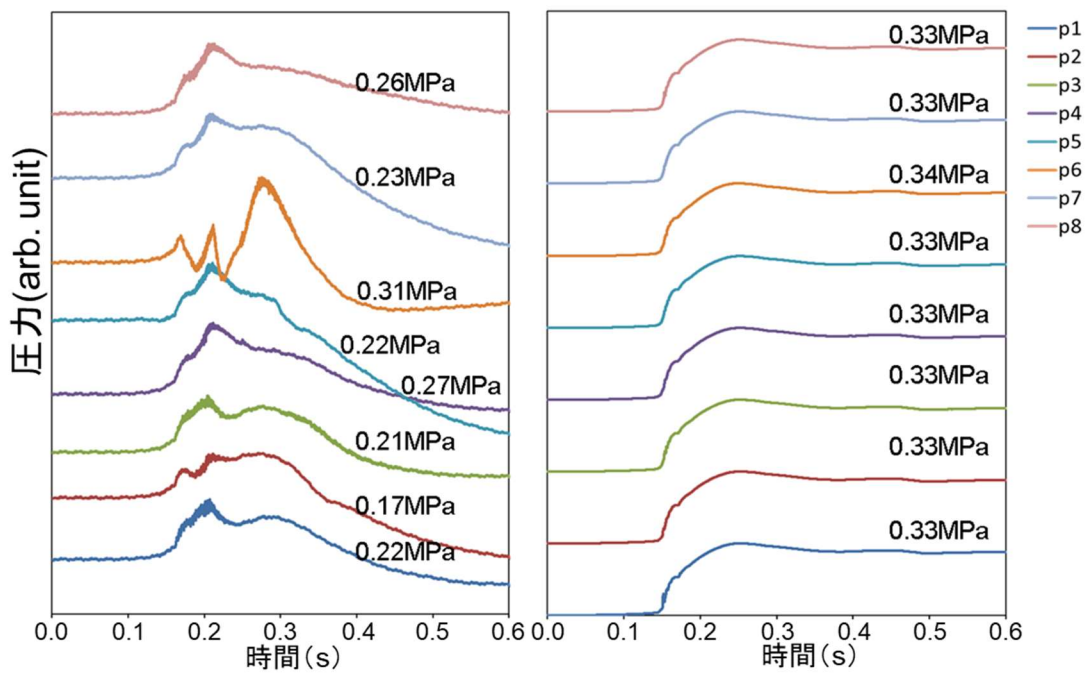
材質(物質)	物性種別	単位	物性値($y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gx^6$)						
			定数(a)	係数1(b)	係数2(c)	係数3(d)	係数4(e)	係数5(f)	係数6(g)
水	密度 ^{※1}	kg/m ³	996.62						
	比熱 ^{※1}	J/(kg-K)	4179						
	熱伝導率 ^{※1}	W/(m-K)	0.6104						

※1 出典:伝熱ハンドブック 日本機械学会(2007年)
(300Kの値を使用)

4.1.3. 結果

燃焼解析によるリサイクル槽の圧力時刻歴を第 4.1.3-1 図の右側に示す。第 4.1.3-1 図の左側は試験結果である。試験では、容器内の反射に由来すると考えられる複数の圧力ピークを観測している。解析では、複数のピークは観測されなかったものの、それぞれの測定点での最大圧力は、試験結果と比較して 1.1 倍から 2 倍であることを確認した（詳細は第 4.1.3-1 表に示す）。

従って、解析から得られた圧力波を LS-DYNA の入力条件とすることで、試験結果よりも大きめの応力が計算できると考えられる。



第 4.1.3-1 図 リサイクル槽における圧力波の比較（左図：試験，右図：解析）

第 4.1.3-1 表 試験と解析の圧力計位置における圧力比較

圧力計番号	①試験 (MPa)	②解析 (MPa)	②÷①
p1	0.26	0.33	1.27
p2	0.23	0.33	1.43
p3	0.31	0.34	1.10
p4	0.22	0.33	1.50
p5	0.27	0.33	1.22
p6	0.21	0.33	1.57
p7	0.17	0.33	1.94
p8	0.22	0.33	1.50

4.2. 弾塑性解析

4.2.1. 解析モデル及び解析条件

解析モデルは、燃焼解析と同様の形状とした。容器はシェル要素としてモデル化した。モデル化部位の材質は、SUS304 であり、材料物性は 40℃における値として第 4.2.1-1 表に示す。

圧力条件として、燃焼解析から得られた各要素の圧力時刻歴を作用させる。

なお、本圧力時刻歴は第 4.1.3-1 図の右側に示すとおり、約 0.35MPa を最大値とする幅の広いピークである。本ピークは、0.5 秒程度で収束することから、水素爆発の発生を仮定する機器の弾塑性解析の入力条件とする 0.5MPa をピークとする三角波(2 秒で収束)は、さらに大きな応力を発生させる条件である。

第 4.2.1-1 表 材料物性値

材質	縦弾性係数 E (MPa)	設計降伏点 Sy (MPa)	設計引張強さ Su (MPa)
SUS304	193000	205	520

4.2.2. 結果

リサイクル槽で発生する最大応力は、第 4.2.2-1 表に示すとおりマンホール付け根において 120MPa (図から読みとりのため要確認)であった。実規模試験においてひずみゲージを設置している貯槽本体の最大応力は、50MPa (図から読みとりのため要確認)であった。いずれも設計降伏点を下回ることから弾性範囲内であった。

第 4.2.2-1 表 応力評価結果

部位	応力値 (MPa)	設計降伏点 (MPa)
マンホール付け根	120	205
貯槽本体	50	205

5. 試験と解析の比較

試験において計測されたひずみは、 $100\ \mu\text{strain}$ であった。縦弾性係数は 193000MPa であることから、応力は $193000 \times 1 \times 10^{-4} = 19.3\text{MPa}$ となる。試験と解析の比である $1.1 \sim 2$ を乗じると、 21.2MPa から 38.6MPa となる。

一方、第 4.2.2-1 表に示すように、貯槽本体と円筒部分において得られた相当応力は 50MPa である。

入力条件とした解析の圧力は、理想的な完全燃焼を前提とした圧力であり、放熱も考慮していない。このため、試験において観測される燃焼現象と比較すると温度及び圧力が大きくなる傾向があり、LS-DYNA より得られた相当応力は試験結果より高い傾向となる。

しかし、算出応力のオーダーは一致しており、大きな差は発生していないと判断できる。

6. 結論

以上に示す適用対象事象及び適用実績及び水素爆発試験との比較により、LS-DYNA を水素爆発事象に適用することは妥当と判断する。

7. 参考文献

- 1) 解析コード (LS-DYNA) 説明資料 (参考資料), 平成 28 年 10 月, 東北電力株式会社, 東京電力ホールディングス株式会社, 中部電力株式会社, 中国電力株式会社, 日本原子力発電株式会社