日本原子力学会「2013年秋の大会」



東北の復興に向けて(5)

原子炉プラントの耐震性について - 巨大地震を教訓として -

2013年9月3日

落合 兼寛

原子力安全推進協会

日本原子力学会 シニアネットワーク連絡会員

--般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute





近年の原子力発電プラントの地震経験

巨大地震:2011年 東北地方太平洋沖地震

女川原子力発電所、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、東海第二発電所

「設計基準を超える」地震: 2005年 宮城県沖地震	女川原子力発電所	(略号 O)
2007年 能登半島地震	志賀原子力発電所	(S)
2007年 新潟県中越沖地震	柏崎刈羽原子力発電所	(KK)
2009年 駿河湾の地震	浜岡原子力発電所	(H)

極めて価値の高い耐震技術データの蓄積

- 多種多様な施設:
- 設備の相互比較が可能:
- 荷重条件(入力)が明らか:
- 耐震設計、施工条件が明確:

発電プラント(土木、建築、機械、電気) 同一型式(BWR)の原子力発電所、多数基立地 地震計が設置され、記録がとれている

建設時期と耐震設計規格・基準類の記録がある

原子力発電設備の耐震クラス	耐震設計で考慮する荷重	設計荷重の比率
S(A) (原子力発電所の安全上重要な設備)	Cクラスの3倍の静的荷重 基準地震動による動的荷重	3 以上
B (放射線に係わる設備で、影響の小さいもの)	Cクラスの1.5倍の静的荷重 (共振について動的に検討)	1.5
C (一般の設備と同等の耐震性を有する設備)	建築基準法並みの静的荷重 (全プラントー律)	1

観測された地震動(揺れ)を「最大加速度値」で比較した報告書

例1 福島第一原子力発電所

号機	観測された最大加速度値		度值	基準地震動S	sに対する最大	応答加速度値
(観測点名)	南北(NS)方向	東西(EW)方向	上下(UD)方向	南北(NS)方向	東西(EW)方向	上下(UD)方向
1 号機(1-R2)	460	447	258	487	489	412
2号機(2-R2)	348	550	302	441	438	420
3号機(3-R2)	322	507	231	449	441	429
4号機(4-R2)	281	319	200	447	445	422
5号機(5-R2)	311	548	256	452	452	427
6号機(6-R2)	298	444	171	445	448	415

(単位:Gal)

表2.2.1-1 東北地方太平洋沖地震による福島第一原発各号機の原子炉建屋基礎版上の最大加速度 値と、基準地震動Ssに対する最大応答加速度値の比較¹¹⁵

「国会事故調」報告書「2.2.1 東北地方太平洋沖地震による福島第一原発の地震動」 「東電の中間報告書は、・・・・、問題がないかのように記している。しかし、基準地 震動に対する応答加速度を下回るのが当然で、一部でも上回ることは耐震設計 上あってはならないことである。」

耐震設計に無縁の方々の事実認識を誤らせる恐れはないだろうか? 設計条件を越える = 壊れる ? (耐震設計と耐震性評価の混同) 「基準地震動」は耐震クラスS(A)の設備の設計条件の一部に過ぎない 実際に損傷しているのは、耐震クラスB、耐震クラスCの設備



例2 女川原子力発電所

■原子炉建屋の最大加速度値

観測位置		観測記録		基準地震動Ssに対する 最大応答加速度値(ガル)			
		最大加速度値(ガル)					
		NS方向	EW方向	UD方向	NS方向	EW方向	UD方向
	屋上	2000 ^{**1}	1636	1389	2202	2200	1388
1日 ###	燃料取替床 (5階)	1303	998	1183	1281	1443	1061
「丂惤	1階	573	574	510	660	717	527
	基礎版上	540	587	439	532	529	451
	屋上	1755	1617	1093	3023	2634	1091
2日 ₩	燃料取替床 (3階)	1270	830	743	1220	1110	968
∠丂惤	1階	605	569	330	724	658	768
	基礎版上	607	461	389	594	572	490
	屋上	1868	1578	1004	2258	2342	1064
2日接	燃料取替床 (3階)	956	917	888	1201	1200	938
い方倣	1階	657	692	547	792	872	777
	基礎版上	573	458	321	512	497	476

※1 当該地震計の最大設定値(2000ガル)を上回っているため参考値

※2 網掛は基準地震動Ssに対する最大応答加速度値を超えていることを示す

--般社団法人 **原子力安全推進協会**

Japan Nuclear Safety Institute

原子力安全・保安院 地震・津波の解析結果の評価に関する意見聴取会(第1回)ー配付資料



女川原子力発電所の地震動(揺れ)による被害の実態



IAEAの女川調査団
 実施時期:2012年7月30日~8月11日
 調査員:IAEA ISSC センター長ほか
 20名の耐震、耐津波専門家
 2週間に及ぶ現場調査と聞き取りの結果
 報告書:2013年春発行

The Structures

Team concluded that the structural elements of the NPS were remarkably undamaged given the magnitude and duration of ground motion experienced during this great earthquake.

筆者が2007年新潟県中越沖地震 直後に、柏崎刈羽原子力発電所を 調査したときの実感と同じ





地震動の揺れによる損傷モード(メカニズム)

2種の破壊形態(日本機械学会、「耐震設計と構造動力学」、日本機械学会P-SC49)

初通過破壊
 構造物の応答が最初に破壊レベルを越えたときに生じる破壊
 (例:延性破壊(脆性的破壊)、塑性崩壊、座屈)

- 累積疲労破壊 累積値があるレベルに達したときに生じる破壊

(疲労、延性消耗)



一般社団法人 原子力安全推進協会 Japan Nuclear Safety Institute





巨大地震 2011年東北地方太平洋沖地震

本震(2011年3月11日14時46分)

O 連動した巨大地震(モーメントマグニチュード:9.0)による地震動



~原子力の一層の安全確保を目指して~ Copyright © 2012 by Japan Nuclear Safety Institute. All Rights Reserved. - 般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute

原子炉建屋内観測記録の最大加速度と波形



原子力発電所設備で経験した地震動と損傷事例 安全に関わる耐震クラスS(A)の損傷は報告されていない





一般社団法人 原子力安全推進協会 Japan Nuclear Safety Institute

Q

2011年東北地方太平洋沖地震での損傷事例



ー般産業施設では、空調用ダクトのような、<u>比較的柔構造</u>で<u>エネルギー</u> <u>吸収能力が小さい</u>設備(部位)の地震被害が顕著のように見える



観測された地震動の特色とDIP計算例

(原子炉建屋基礎版上)	最大加速度(合成值)	計測震度	A _{JMA}	標準CAV
女川1号機	637 Gal	5.6	225 Gal	6.9 G-sec
福島第一6号機	460	5.7	266	6.4
福島第二1号機	290	5.5	202	5.4
東海第二	262	5.3	157	2.7
柏崎刈羽1号機	685	6.0	346	1.7



- 般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute



地震計が設置されている床で観察された損傷とDIP



基礎ボルトのせん断荷重耐力試験(初通過破壊)

試験実施者:東京電力、実施場所:NIED兵庫耐震工学研究センター



柏崎刈羽1号原子炉建屋基礎版 (EW)観測波形の約1.9倍で加振



設計上の許容荷重では破損しない が、約2倍では破損を確認

基礎ボルトの耐震設計が重要

基礎ボルト 重錘



ベースプレート 基礎台

		Mode Type *1 Bolt Bolt diameter Bet depth (mm) Bolt (mm) Bolt diameter Bet depth (mm) Bolt (mm) Bolt (mm) Bolt (mm) Bolt (fastening force force) Bolt (mm) Bolt (fastening force) Bolt		Sheer		Parameter	Test r	esult
No	Mode Type *1		t Embedment Shear – ter depth (mm) (mm)	Bolt Embedment diameter depth (mm) depth (mm) faster	Give initial fastening force	Observed Load *2	Fracture of anchor portion	
п.,.	TypeA Design allowable		76	40		1.01		
П-1-1	load $III_AS \ge 1.0$		/0	40		0.92		
	TypeA	1	76	10		0.59		
II-1-2	load $III_AS \ge 0.5$	76	76 40		0.57			
Π.1.0	TypeA	7	76 40	40		1.05		
П-1-3	load $III_AS \ge 1.0$			/6	40		0.94	
	TypeA	M8	76	10	v	1.91	Х	
п-1-4	load $III_AS \ge 2.0$		76 40	40	X	1.86	Х	
	TypeA with sleeve		76 8		00		0.96	
П-1-5	load $III_AS \ge 1.0$			80		1.07		
	TypeB Design allowable		150		40		0.94	
ш-1-6	load $III_AS \ge 1.0$			40		0.96		

*1 TypeA: Without concrete equipment base TypeB: With concrete equipment base

*2 Observed Load = (Maximum load by Maximum acceleration) / (Design allowable load $III_{A}S$)

一般社団法人 原子力安全推進協会 Japan Nuclear Safety Institute



東北地方太平洋沖地震で揺れの激しかった場所での損傷事例



主要設備が設置された場所のA_{JMA}は新潟県中越沖地震より小さい





静的震度を用いた耐震設計の有効性(初通過破壊に対して)



対して、弾性範囲の許容値を設定

最大加速度 (Gal)

耐震クラス(静的震度)	S(A) (0.6G)	B (0.3G)	C (0.2G)
計測震度(震度階) I	6.4(震度6強)	5.8(震度6弱)	5.5(震度6弱)

東北地方太平洋沖地震では建屋の主要部に設置される安全上重要な設備の基礎ボルトの切断は発生していない





配管の地震時耐力試験(累積疲労破壊)

試験実施者:NUPEC/JNES「耐震信頼性実証試験(配管終局強度試験)」



図 4.3-1 終局強度試験体の全景

配管	口径200A、Sch 40
材質	STS410
形状	3次元(左図)
固有振動数	3.8→3.6Hz
損傷モード	ラチェットを伴う 低サイクル疲労

配管を損傷させるため、配管サ ポートを一部取り外し、重錘を 付加した共振状態で加振

5回目の加振時にエルボー部で 貫通亀裂が発生 (累積疲労破壊)



-般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute

振動台上加振波形 最大加速度:1877Gal、計測震度:6.4、標準CAV:23.2G-sec



東北地方太平洋沖地震の観測値



4回繰り返しても機能に支
障なし(5回目に亀裂貫通)

回数	標準CAV	
1	23.2 G-sec	
2	46.5	
3	69.7	
4	92.9→ <mark>90</mark>	
5	116.2(損傷)	

原子炉建屋	標準CAV(A)	余裕(<mark>90</mark> /A)
屋根	20.4 G-sec	4.4
運転床	12.8	7.0
2階床	7.6	11.8
基礎版上	6.4	14.1

タービン建屋	標準CAV(A)	余裕(<mark>90</mark> /A)
T−G架台	12.3 G-sec	7.3
基礎版上	6.5	13.8

溶接配管の耐震余裕は極めて大きい (継続時間の極めて長い巨大地震で確認された)

> --般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute





岡構造で設計された設備のエネルギー入力は極めて小 (日本の原子力発電所耐震設計の基本:剛構造設計)

> 一般社団法人 原子力安全推進協会 Japan Nuclear Safety Institute





- 般社団法人 **原子力安全推進協会** Japan Nuclear Safety Institute

g

配管に関する「耐震裕度の定量化に関する専門家パネル」の見解

米国"the Expert Panel on the Quantification of Seismic Margin"(1980年代)

【配管の損傷モード】

配管は地震の慣性力によって破損した例はなく、損傷の多くは下記の特殊

な場合に発生している

〇構造上の問題

(脆い配管材質、過度の腐食、溶接欠陥、ネジ継手、機械継手など)

〇過大な強制変形

(地盤沈下、機器の移動、分枝管については母管の移動)

【結論】耐震設計されていなくても、配管系は本質的に地震に強い

〇現在の原子力配管の設計プラクティスは過剰なまでに安全側(conservative) であることが解析評価及び経験で示されている

米国の現状 対象設備種別ごとの脆弱性により対応を変える スクリーニング

- 1F事故を受けて緊急に実施された点検では、溶接配管を除外し、 迅速化かつ重点化を図っている
- O 塑性エネルギー吸収係数により配管などの地震荷重を低減(ASCE規格)



巨大地震の技術的教訓

- 1. 近年の設計基準を超える地震動(揺れ)に対しBWR 26基の安全関連施設は 全て正常に機能している。
- 損傷データの蓄積により、脆弱な設備(部位)は特定することができ、地震動との関係を適切な指標で表すことによって耐震性能が評価できる。

加速度最大値 → DIP(気象庁震度階、標準CAV など) (耐震設計用) (耐震性評価用)

- 3. 溶接配管の耐震設計規格は過 剰であり、スクリーニングするこ とにより、耐震性評価作業は大 幅に軽減され、迅速な評価が可 能となる。
- 4. 静的震度(全国一律)で設計した耐震クラスB、Cの設備の多くは巨大地震にも耐えている。
- 5. 原子力発電所で得られた知見 は一般産業施設との共通性を 有している。





原子力発電所の耐震性(大地震発生後の電力供給)

1995年兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)の火力発電、変電設備との比較



多くの国々では地震動による原子炉自動緊急停止(スクラム)は実施していない

地震直後の電力供給を重視

一般社団法人 原子力安全推進協会
 Japan Nuclear Safety Institute



東北の復興に向けて(高い耐震性を有する原子力発電所の役割)

1. 地震活動期に入った日本→東北の経済的価値が極めて大

発生年月日	年号	マグニチュード	備考
869年7月13日	貞観11年(貞観地震)	8.3	三陸沖(津波)
(870年)	(韓国)	(6.5)	(慶州:新羅の首都)
878年11月1日	元慶2年(相模·武蔵地震)	7.4	関東地方
880年11月23日	元慶4年(出雲で地震)	7.0	中国地方
881年1月13日	元慶4年(京都で地震)	6.4	関西地方
887年8月26日	仁和3年(仁和地震)	8.3	南海、東海道沖(津波)

出典:「地震の事典」、朝倉書店、普及版第1刷 2010年3月

Japan Nuclear Safety Institute

- 早期復興、経済拡大のための安定したエネルギー源:原子力発電所
 地震で長期停止しない原子力発電所:社会コンセンサスを得るための
 迅速な評価、説明性 (スクリーニング)
- 2. 一般産業施設の耐震性向上 原子力発電所で得られた知見のTT(原子力分野は産業全体の技術を牽引)
- 3. 国際貢献

東北電力、東京電力の成功体験の国外原子力発電所へのTT



謝 辞

- 1. 本報告は、国際原子力機関(IAEA)のEBP(Extra-Budgetary Project) Work Area 3およびISSC (International Seismic Safety Centre) EBP Work Area 4における討議を参考としています。
- 2. 本報告のDIPは、東北電力、東京電力、中部電力、関西電力、日本原子 力発電の各社が日本地震工学会を通して公開した地震観測記録をもと に計算しております。







