



10Hzを超える地震動成分と機械設備の健全性 に関する考察

2014年 12月 5日

落合 兼寛

(一般社団法人) 原子力安全推進協会



検討の背景

10Hzを超える地震動成分の扱いに関する 日 - 米の相違

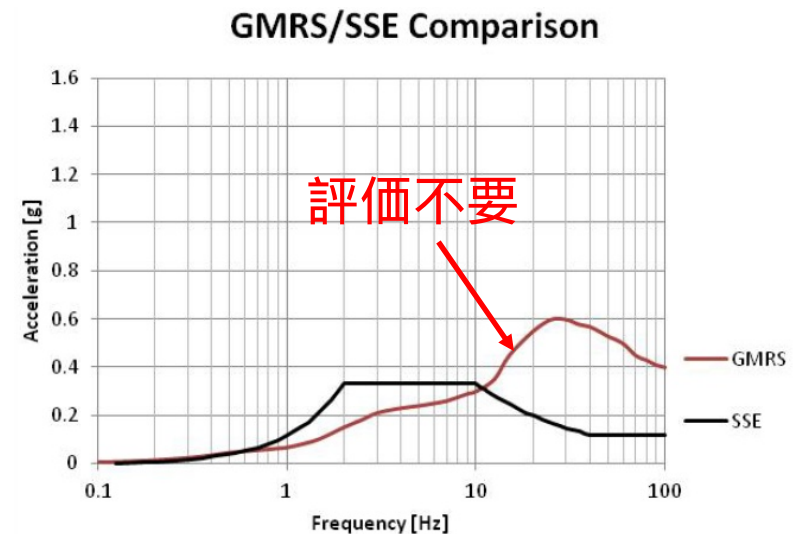
米国

- ・ OBE (SSE) EXCEEDANCE CRITERIA
観測された地震動が設計基準地震動を超えたか否かの判定
振動数範囲： 1Hz - 10Hz (10Hz 以上は評価対象外)
- ・ 地震ハザードのスクリーニング
(Near Term Task Force 2.1 Seismic)
10Hz以上でのみ設計基準地震動を超える地震ハザードは評価不要

日本

- ・ 耐震設計、耐震性評価における
高振動数領域のスペクトル拡幅
- ・ 最大加速度値 (加速度応答スペクトルのZPA値) を考慮

極めて剛構造の小口径配管 → 損傷リスク大



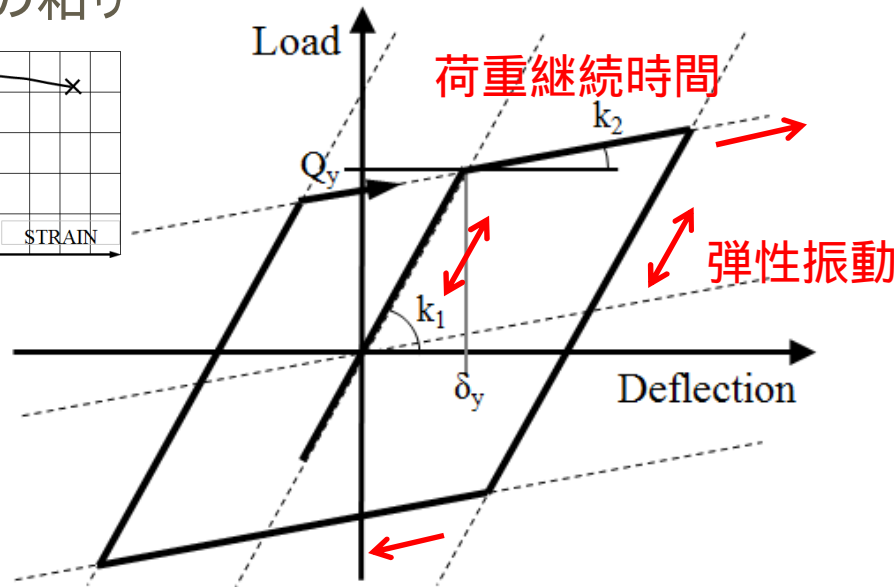
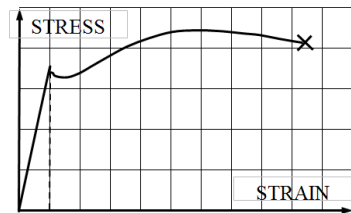
機械設備の地震荷重(交番性)による損傷

損傷モード:	延性破壊	極低サイクル疲労破壊	(座屈、衝撃…)
主要因子:	塑性率	塑性歪の繰り返し数	慣性力

〔 加速度応答スペクトルで 考慮可: 応答加速度、設備の減衰(線形領域)
 (弾性応答を対象) 考慮不可: 加速度の継続時間、繰り返し数 〕

荷重変形曲線(1自由度系バイリニアモデル)

金属材料の粘り



初期剛性 k_1

$$k_1 = \frac{4 \pi^2 W}{T^2 g}$$

固有周期 T

減衰定数 h (弾性域)

二次剛性 k_2

降伏耐力 $Q_y = \alpha W$

静的震度 α

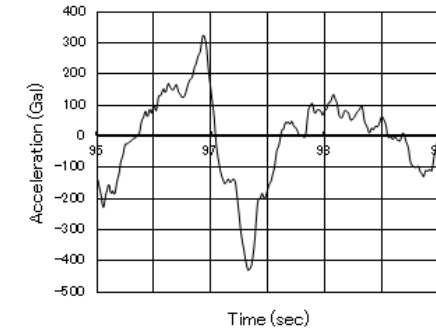
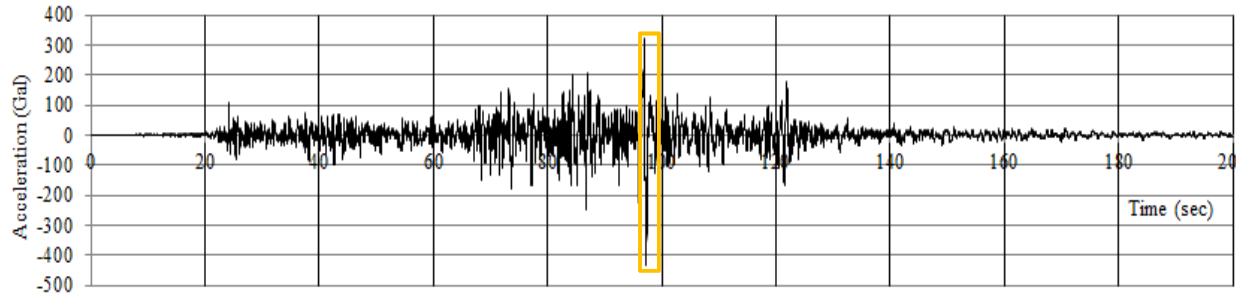
静的震度: 弾塑性地震応答の重要な因子(弾性挙動範囲の担保)



1自由度系バイリニアモデルの地震応答解析例

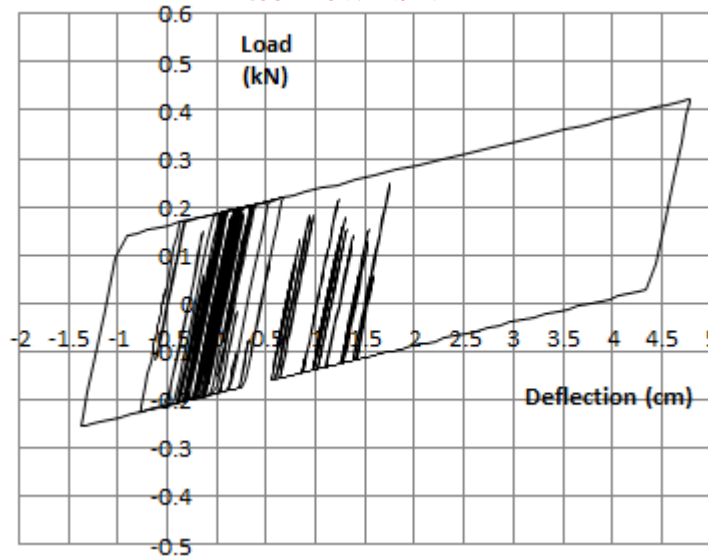
2011年東北地方太平洋沖地震 福島第一原子力発電所6号原子炉建屋
基礎版上(EW方向) 最大加速度:431Gal

ピーク部拡大

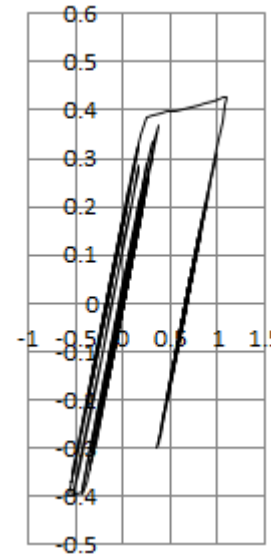


5Hz, $h=0.05$, $k_2=0.05k_1$

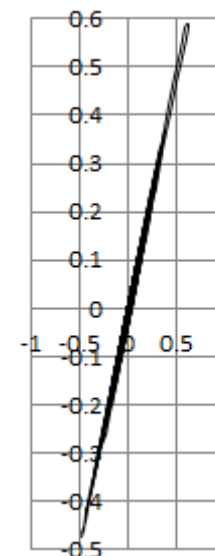
静的震度 : 0.2



0.4



0.6



静的震度(0.6)程度で設計された設備はほぼ弾性域で振動している

↓
損傷しない

世界最高水準の安全性の追求
~たゆまぬExcellenceをめざして~

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



機械設備の損傷に繋がる弾塑性応答と地震動特性

機械設備の被害経験

- ・1995年兵庫県南部地震
(阪神淡路大震災)
 - ・2007年新潟県中越沖地震
(柏崎刈羽原子力発電所)
- 共に震源が近く、キラーパルスが観測されている

損傷の主要因子:

- ・ピーク加速度の継続時間
(キラーパルス)
- ・塑性変形のレベルと繰り返し数



震源が比較的近い地震動として15地震28波形を選択

評価対象とした地震と観測点(28波形)

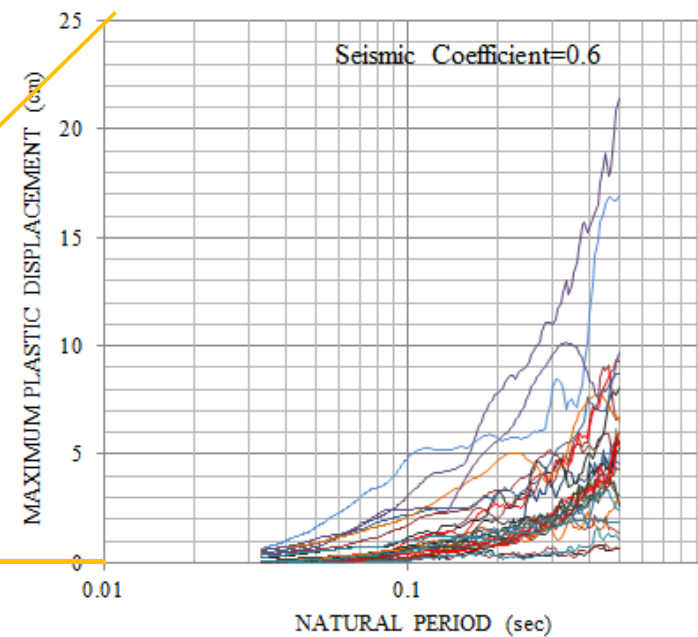
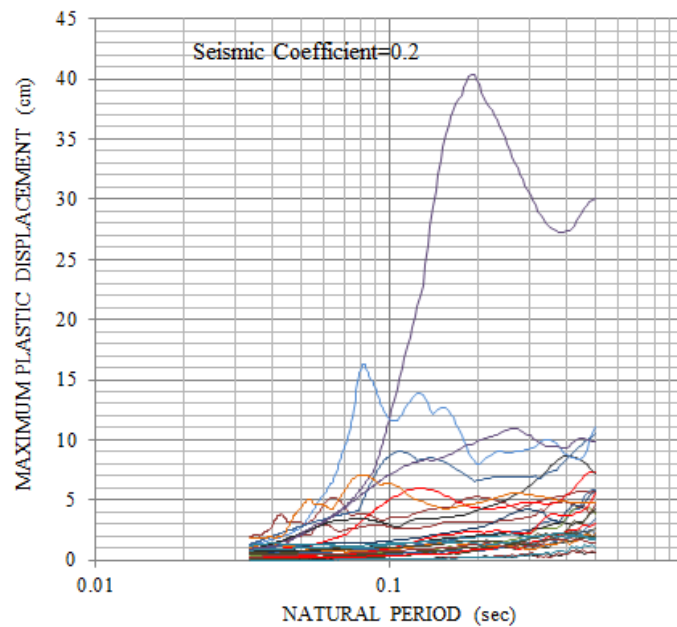
1	1996年宮城県北部(鬼首)地震(鳴子)
2	1997年3月鹿児島県北西部地震(出水、川内)
3	1997年5月鹿児島県北西部地震(出水、宮之城、川内)
4	1997年山口県北部地震(津和野)
5	1998年岩手県内陸北部地震(田沢湖、玉川、西根)
6	2000年鳥取県西部地震(伯太、仁多、日野、江府、日南)
7	2003年宮城県北部地震(石巻)
8	2004年北海道留萌支庁南部地震(港町)
9	2008年岩手・宮城内陸地震(金ヶ崎、一関東、鳴子)
10	2011年長野県北部地震(津南、野沢温泉)
11	2011年静岡県東部地震(富士宮)
12	2011年茨城県北部地震(高萩、日立)
13	2011年和歌山県北部地震(広川)
14	2012年茨城県北部地震(高萩)
15	2013年栃木県北部地震(栗山西)



応答最大変位のスペクトル特性と静的震度

静的震度:0.2

静的震度:0.6



塑性状態の評価指標

$$\text{塑性率 (DF)} = \frac{\text{最大応答変形}}{\text{降伏変形}}$$

降伏変形 固有周期

(剛な設備の塑性率は大きくなる)

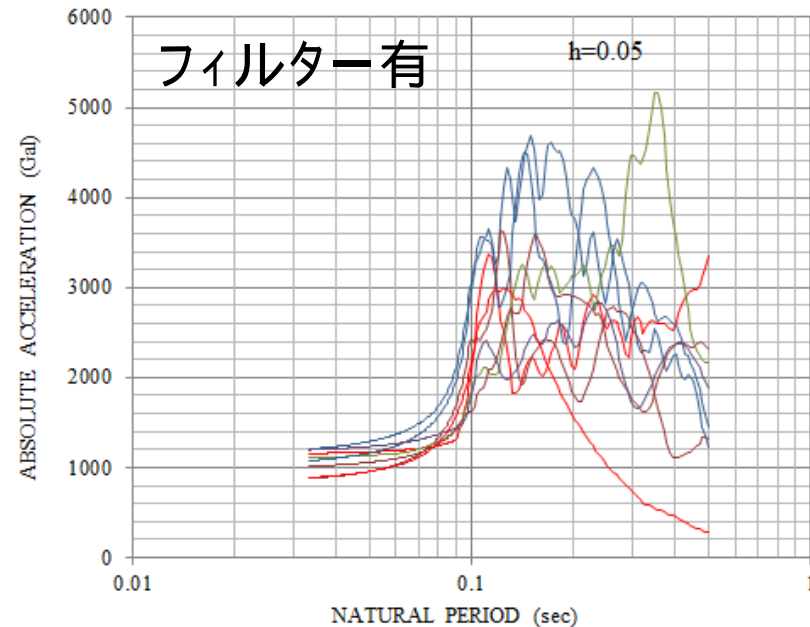
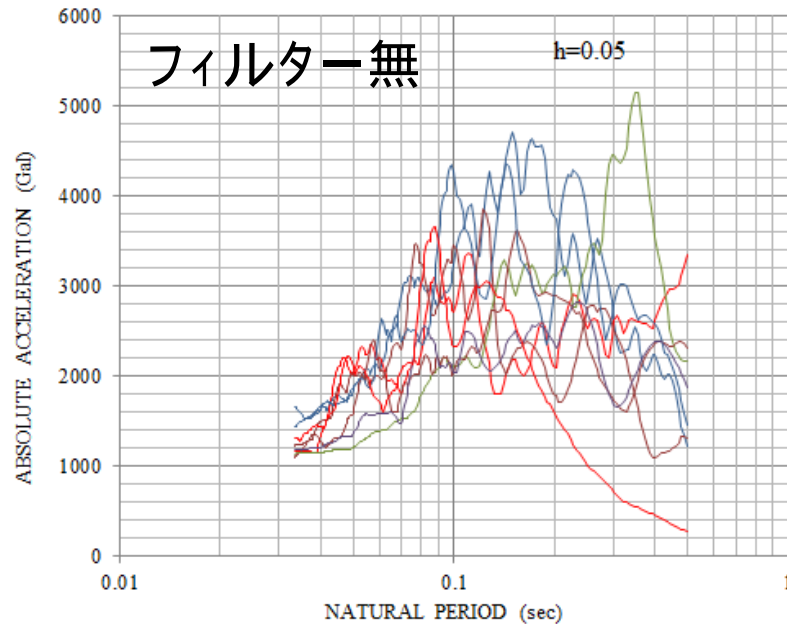
1	1997年5月鹿児島県北西部地震(宮之城)
2	2000年鳥取県西部地震(日野)
3	2004北海道留萌支庁南部地震(港町)
4	2008年岩手・宮城内陸地震(一関東)
5	2011年静岡県東部地震(富士宮)
6	2011年茨城県北部地震(高萩)
7	2011年和歌山県北部地震(広川)
8	2013年栃木県北部地震(栗山西)

世界最高水準の安全性の追求
~たゆまぬExcellenceをめざして~

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

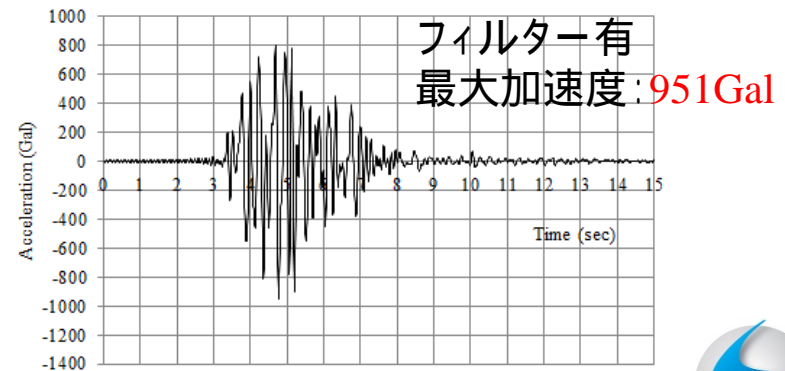
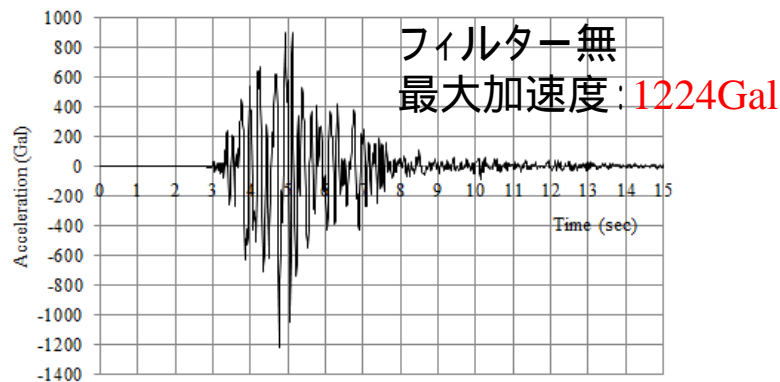


10Hzを超える振動数成分のフィルタリング



加速度応答スペクトル 10Hzハイカットフィルター比較 (8波形)

地震時刻歴波形例 (2013年栃木県北部地震、栗山西観測波形NS方向)



～たゆまぬExcellenceをめざして～

一般社団法人 原子力女王推進協会
Japan Nuclear Safety Institute

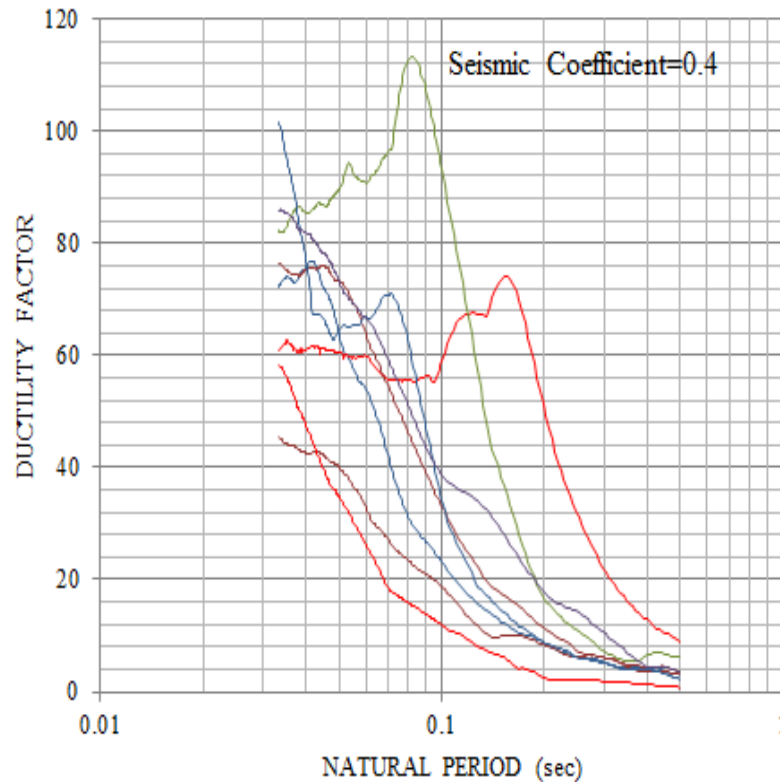


10Hzを超える振動数成分の寄与の評価

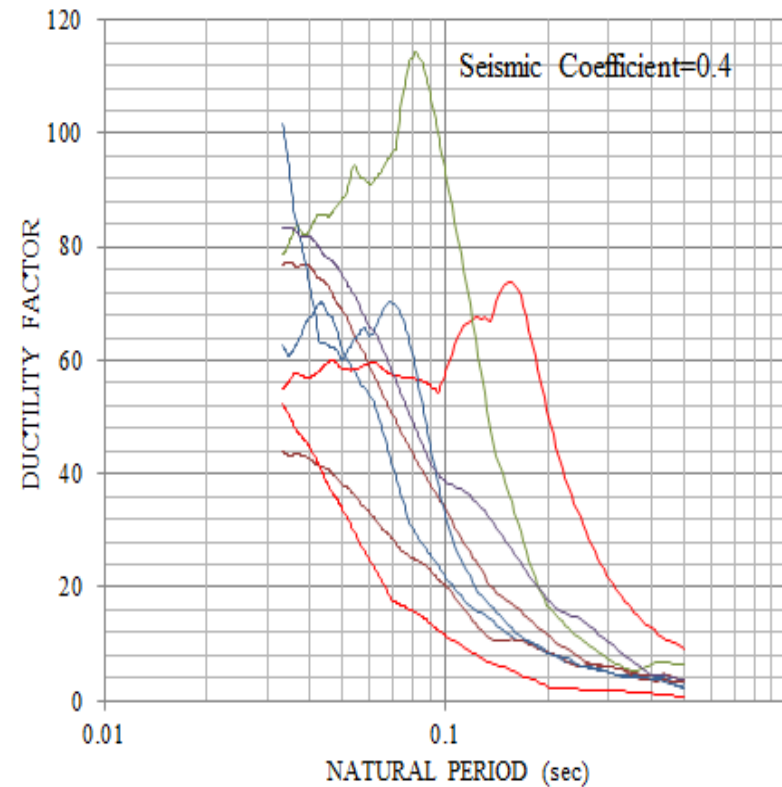
塑性率 (DF) スペクトル特性評価例

8波形、静的震度：0.4 減衰定数：0.05 (弾性域)、二次剛性：0.05 k_1

10Hz フィルター無



10Hz フィルター有



塑性率は10Hz以下の振動数成分でほぼ決定されている

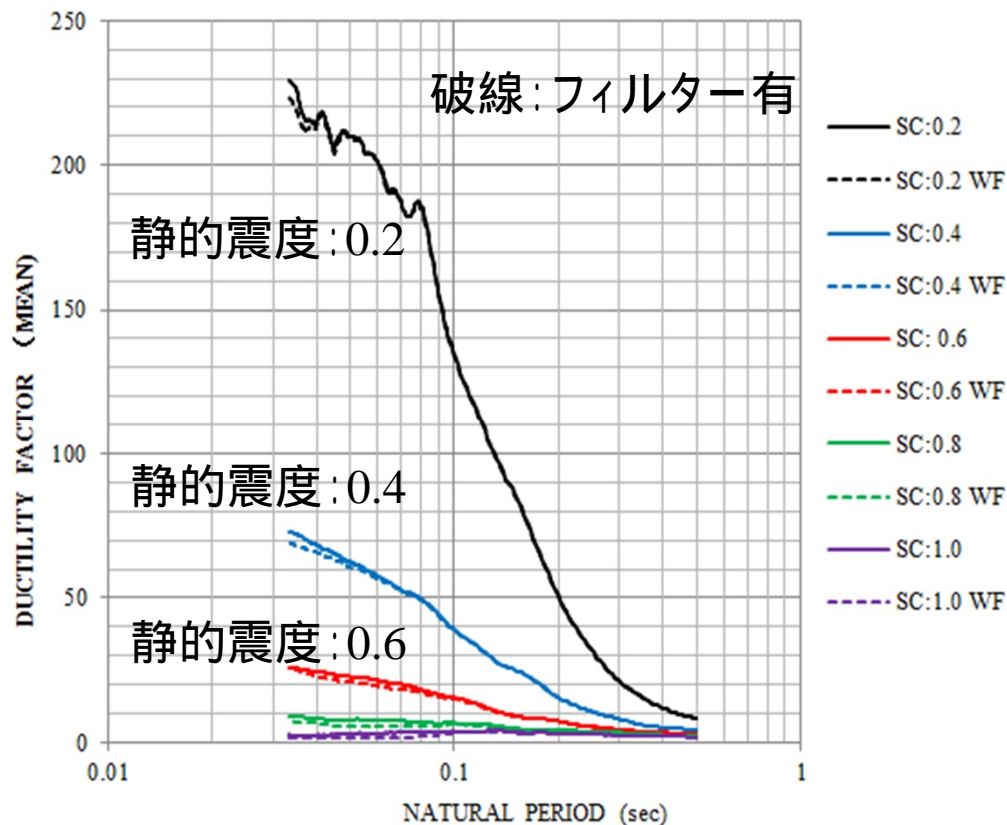
世界最高水準の安全性の追求
～たゆまぬExcellenceをめざして～

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

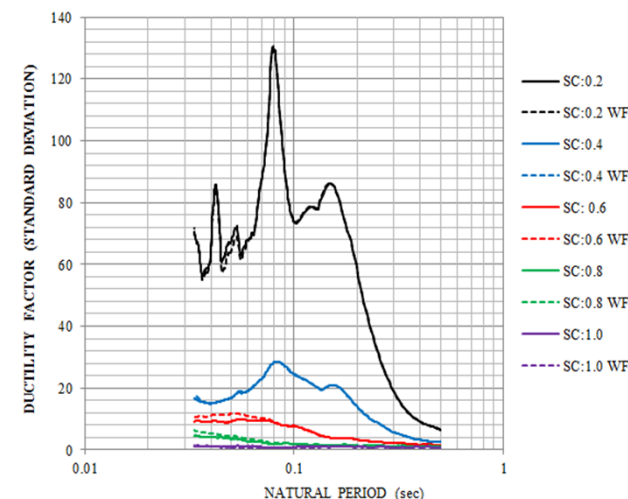


塑性率 (DF) 応答スペクトルの静的震度依存性 10Hzフィルターの影響 (8波形)

塑性率 8波形平均値



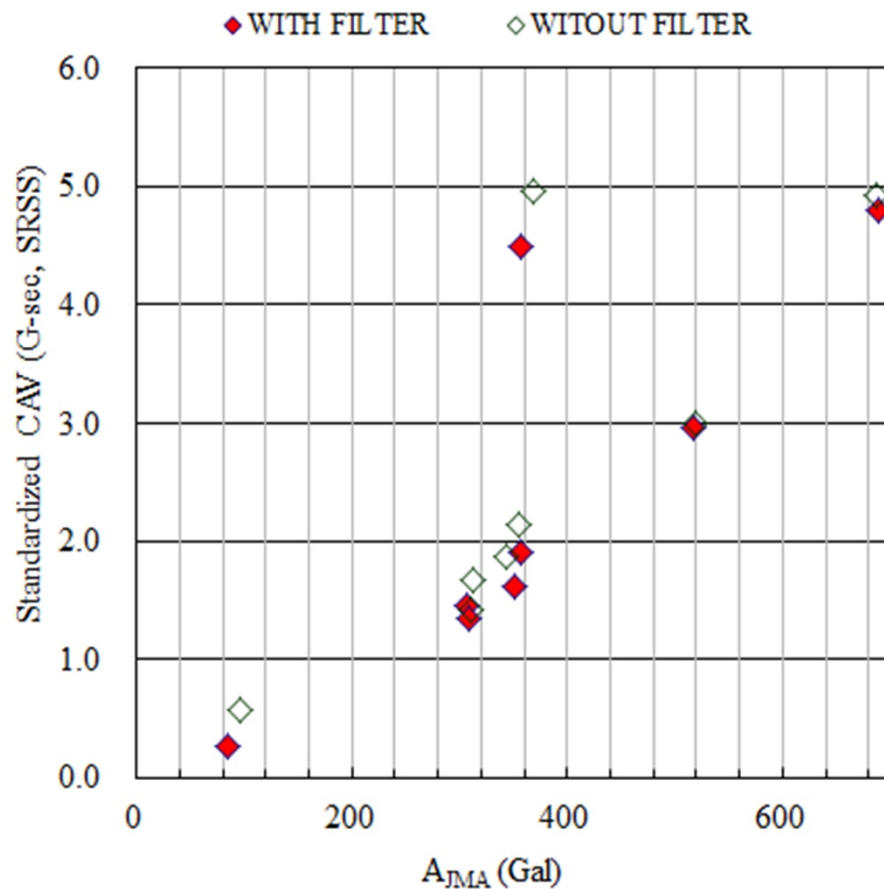
標準偏差



静的震度に依存せず、10Hz以上の成分の影響はない
高振動数成分の変位振幅が小さいという本質的な影響と考えられる



損傷に関する地震動指標と10Hzフィルター (8波形平均)



損傷に関する地震動指標

CAV値

$$CAV = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt$$

a(t) : 加速度時刻歴

t_{max} : 主要動の継続時間

配管終局強度振動試験
(NUPEC/JNES)

損傷モード: ラチェットを伴う極
低サイクル疲労破壊

標準CAV > 90 G-sec

10Hz以上の成分をカットすることで、弾性域の繰返し数の影響が標準CAVの変化となって現れるが、累積疲労損傷の発生までには大きな余裕がある



まとめ

延性に富んだ金属材料からなる機械設備の地震損傷について、近地地震観測記録の代表例について1自由度系バイリニアモデルを用いた塑性域の検討を実施した。

1. 変位振幅が小さい(継続時間の短い)10Hz以上の成分は、地震動の強さと損傷を結びつける重要な因子と考えられる塑性率(DF)に有意な影響を及ぼさず、耐震設計、評価上は無視できる。(米国の考えが妥当)
2. 我国の現行の機械設備の動的耐震設計手法では、これらの、実際の破壊には寄与しない加速度応答スペクトルの高振動数領域についても、応答加速度と質量との積を地震荷重として強度評価している例があり、過剰な耐震設計が懸念される。

塑性域の応答を考慮した耐震設計、評価手法の確立が急務であるが、便宜的に高振動数成分のフィルターを考慮した加速度応答スペクトルによる弾性設計、評価手法も検討する価値があると思われる。



謝 辞

本報告では、(独立行政法人)防災科学技術研究所が提供しているK-NET及びKiK-netの地震観測記録を用いて地震応答解析を実施いたしました。ここに感謝申し上げます。

